

УДК 621.039.53:533.9

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**Н.А. Азаренков, В.Н. Воеводін*, В.Г. Кириченко, Г.П. Ковтун****Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина**61108, г. Харьков, пр. Курчатова, 31**E-mail: kirichenko@pht.univer.kharkov.ua***Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»**61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1**E-mail: gkovtun@kipt.kharkov.ua**Поступила в редакцию 10 декабря 2009 г.*

Представлен обзор результатов исследования, разработок и использования наноматериалов в ядерной энергетике и технике. Приведены основные свойства наноструктурных материалов. Рассмотрены перспективы применения наноматериалов в ядерной энергетике, связанные с созданием наноструктурных материалов и покрытий конструкционных элементов АЭС и будущих ТЯР для увеличения показателей твердости и прочности, повышения коррозионной и радиационной стойкости. Также рассмотрены основные проблемы, возникающие при разработке методов модифицирования ядерного топлива, разработке дисперсно-упрочненных сталей, создании пористых керамик и каркасов, фильтров и мембран, разработке наноструктурных суперпроводников и сверхпроводников, создании наноструктурных магнитных композитов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наноматериалы, нанотехнология, ядерный топливный цикл, радиационная и коррозионная стойкость.

NANOSTRUCTURES MATERIALS IN NUCLEAR ENERGETICS**N.A. Azarenkov, V.N. Vojevodin*, V.G. Kirichenko, G.P. Kovtun****Kharkov National Karazin University**31 Kurchatov St., Kharkov, 61108, Ukraine***National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"**1, Academicheskaya St., Kharkov, Ukraine, 61108*

The review of results of the investigations, researchers and using of nanomaterials in nuclear energetic and engineering are presented. The basic properties of nanostructure materials are adduced. The perspectives of nanomaterials applications in nuclear energetics which connected with creating of nanostructure materials and coating for constructive elements AES and future TNR for increasing of hardness and strength indices for increasing of corrosion and radiation stability are considered. Also the principal problems which arise under developing methods of nuclear fuel modification, under elaboration of strengthening oxide disperse steels and porous ceramics, frames, filters and membranes, elaboration of nanostructure conductors and superconductors and elaboration of nanostructure magnetic composites are considered.

KEY WORDS: nanomaterials, nanotechnology, nuclear fuel cycle, corrosion and radiation stability

НАНОСТРУКТУРНІ МАТЕРІАЛИ В ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИЦІ**М.О. Азарєнков, В.Н. Воеводін*, В.Г. Кіріченко, Г.П. Ковтун****Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна**61108, Харків, пр. Курчатова, 31***Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»**61108, м. Харків, вул. Академічна, 1*

Представлені результати дослідження, розробки і використання наноматеріалів в ядерній енергетиці і техніці. Наведено основні властивості наноструктурних матеріалів. Розглянуто перспективи використання наноматеріалів в ядерній енергетиці, які пов'язано з створенням наноструктурних матеріалів і покриттів конструкційних елементів АЕС і наступних ТЯР для збільшення показників твердості та міцності, підвищення корозійної та радіаційної стійкості. Також розглянуто основні проблеми які виникають при розробці методів модифікування ядерного палива, розробці дисперсно-зміцнених оксидами сталей, створенні пористих керамік і каркасів, фільтрів і мембран, розробці наноструктурних суперпровідників і надпровідників, створенні наноструктурних магнітних композитів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: наноматеріали, нанотехнології, ядерний паливний цикл, радіаційна і корозійна стійкість

Ядерная энергетика является главным источником электрической и тепловой энергии и обеспечивает энергетическую независимость Украины. После ввода в эксплуатацию двух блоков по 1000МВт на Хмельницкой АЭС и Ровненской АЭС Украина вошла в тройку ведущих европейских стран по производству электроэнергии на АЭС. Ядерная энергетика включает добычу и обогащение ядерного топлива, производство конструкционных материалов и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) для активной зоны ядерных реакторов, выгорание топлива в активной зоне ядерных реакторов и производство электроэнергии, переработку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), регенерацию, удаление и захоронение радиоактивных отходов (РАО). Эта многоотраслевая цепочка составляет замкнутый ядерный топливный цикл (ЯТЦ). Реально в Украине создание замкнутого ЯТЦ является дискуссионным, хотя многие элементы цикла существуют и поэтому необходимо проведение интенсивных фундаментальных и прикладных исследований в этой области [1,2].

В ядерной энергетике и ядерной промышленности очень важна проблема модернизации топливных и конструкционных материалов для активной зоны ядерных реакторов. К топливным материалам относится широкий круг урановых и трансурановых элементов и их соединений. К конструкционным материалам ядерных реакторов принадлежат аустенитные, ферритные, ферритно-мартенситные и другие сорта сталей и сплавов, графит и углеродные материалы, циркониевые сплавы, различные керамические материалы. Кроме того, важным является решение проблемы окончательного и надежного захоронения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО), а также разработка новых квазистационарных методов переработки и минимизации жесткости нейтронного спектра ОЯТ. В связи с этим одной из задач является развитие фундаментальных и прикладных исследований в области радиационного материаловедения и радиационных технологий. При проведении таких исследований важной задачей является создание новых топливных и конструкционных материалов и новых методов анализа и контроля материалов.

Нанотехнологии в последнее время стали применяться практически во всех сферах новейших технологий и по сути дела превратились в междисциплинарную область науки и техники. В атомной отрасли нанотехнологии применялись еще до того, когда стали использовать приставку «нано», так как созданные топливные и конструкционные материалы во многом были основаны на качественном изменении свойств материалов при переходе в нанометрический диапазон размеров [3-5].

Целью настоящей работы является краткий обзор результатов исследований и последних разработок в области использования конструкционных и функциональных наноструктурных материалов в ядерной энергетике и технике.

НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

Интерес к наноструктурным материалам (наноматериалам) и нанотехнологиям обусловлен рядом важных проблемных причин:

- Нанотехнологии позволяют получить принципиально новые квантовые устройства и материалы с характеристиками, существенно превосходящими достигнутый уровень;
- Нанотехнология объединяет знания и технику в области физики, химии, материаловедения, математики, биологии, медицины, компьютерной техники;
- Нанотехнологии способствовали созданию новых направлений, как в этих областях знаний, так и развитию новых (квантовый компьютер, спинэлектроника и т.п.).

Термин «нанотехнология» означает совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами от 1 до 100 нм, хотя бы в одном измерении [3-5]. Соответственно объекты, содержащие структурные элементы, размеры которых хотя бы в одном измерении менее 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками, относят к наноматериалам. Термины «наноструктура», «нанокompозиты», относят к материалам, образованным совокупностью наночастиц определенного размера и состава, либо полученным введением наночастиц в какие-либо матрицы с образованием у объектов качественно новых свойств, связанных с проявлением наномасштабных факторов. К наноструктурам также относят макроскопические материалы, составляющими которых являются нанообъекты и наноразмерные элементы. Первичные образования из небольшого числа атомов ($10 \div 10^4$) размером $0,1 \div 1$ нм относят к нанокластерам. Под наночастицами обычно подразумевают промежуточные образования из атомов (молекул), малых молекулярных нанокластеров и имеющих характеристические размеры < 100 нм. Физические и химические свойства кластера зависят от числа атомов в нём. Когда свойства кластера перестают зависеть от числа атомов, можно считать, что в малом объёме получен макроскопический материал. Для низкоразмерных наносистем ограничение волновых функций может быть в одном, двух и трех координатных направлениях систем. В таких случаях говорят о системах с пониженной размерностью 2D-типа (двумерные), 1D-типа (одномерные) и 0D-типа (нульмерные). Примером нуль-мерных наносистем, т.е. размеры, которых меньше 100 нм в трех измерениях являются кластеры с числом атомов от 10 до 10^4 , фуллерены C_{60} - C_{100} . Одномерными наноструктурами с размерами меньше 100 нм в двух измерениях являются, например, углеродные нанотрубки (УНТ). Примером двумерной наноструктуры служит графен [6], представляющий собой высокопроводящий единичный слой графита, размеры которого меньше 100 нм только в одном направлении. В результате химической реакции графена с водородом образуется новое вещество - графан, который в отличие от графена ведет себя как изолятор [7]. Таким образом, в зависимости от размерности нанообъектов квантово - механические явления могут проявляться в трех, двух, либо в одном направлении.

До определения наноструктур и наноматериалов и выделения их в особый класс уже существовали и применялись разнообразные материалы с ультрадисперсными частицами и наночастицами. Ультрадисперсные порошки металлов, сплавов, оксидов и полупроводников, а также эти вещества в объёмном состоянии, с зёрнами микронного размера, получили широкое применение. Таким образом, классификация материалов по размерному признаку при переходе от дисперсных и ультрадисперсных частиц, составляющих структуру материала, к наночастицам, вполне закономерна.

В наноструктурных материалах проявляются существенные отличия практически всех физических свойств

по сравнению с макроскопическими или микроскопическими объектами. Основные проявления размерных эффектов заключаются в следующем:

- общая причина отличия свойств наносистем от свойств макроскопических систем - это сопоставимость размеров их структурных элементов с длиной волн коллективных возбуждений;
- уменьшение с размерами наноструктур времени протекания разнообразных процессов;
- большую роль в свойствах наноструктур играет туннельный эффект;
- кластер плавится при существенно более низкой температуре, чем массивное твердое тело, и точка плавления не совпадает с точкой замерзания;
- кластеры могут иметь отрицательную теплоемкость: при сообщении некоторого количества теплоты их температура падает за счёт перестройки структуры;
- доля поверхностных атомов увеличивается по мере уменьшения размеров частицы. Для наночастиц практически все атомы «поверхностные», поэтому их химическая активность очень велика
- с уменьшением размера зерна возрастает роль поверхностей раздела
- свойства поверхности в нанометрическом диапазоне отличаются от микроструктурной поверхности
- размер кристаллитов сопоставим с длиной свободного пробега носителей при анализе кинетических явлений

Для металлов влияние размера зерен нанометаллов и наносплавов на электронные свойства может проявляться лишь для очень малых кристаллитов или в очень тонких пленках.

В своем большинстве наноматериалы существенно неравновесные за счет:

- избыточной свободной поверхностной энергии, обусловленной значительным числом поверхностей раздела;
- формированием в материалах неравновесных фаз, образованием пересыщенных твердых растворов, сегрегаций примесных атомов на границах раздела, пор и межзеренных неоднородностей;
- неравновесной концентрацией точечных дефектов и наличием других несовершенств кристаллического строения материалов;
- остаточными напряжениями, обусловленными технологией и условиями получения материала.

Анализ эволюции структурно-фазового состояния металлических материалов, в частности изменения диаграмм состояния за счет размерных эффектов вызывает значительные трудности из-за недостатка ряда значимых термодинамических параметров. Например, известно, что температура эвтектики в ряде систем снижается при размере зерен менее десятков нанометров, хотя надо учитывать, что расчеты носят оценочный характер в простейшем приближении регулярных растворов. Фазовые превращения в наночастицах оксидов в зависимости от размера могут отличаться за счет вклада упругой энергии, так в наночастицах ZrO_2 зафиксировано одно-временное формирование моноклинной (область существования $T < 1440$ К) и тетрагональной ($T = 1440-2640$ К) модификации [5]. Изменение динамики колебаний атомов проявляется в изменении температуры плавления решеточной компоненты теплопроводности и связано с увеличением амплитуды колебаний атомов в нанокристаллах и появлением в фоновом спектре дополнительных как низкочастотных (смягчение спектра), так и высокочастотных мод. Обнаруженное повышение теплоемкости для наноматериалов обусловлено действием деформации при получении наночастиц. Уменьшение размеров кристаллитов приводит к уменьшению характеристической температуры. Изменение фононного спектра наноматериалов проявляется и в уменьшении температуры плавления, что установлено для многокомпонентных систем. В однородных однокомпонентных наноматериалах при температурах близких к температуре плавления происходит интенсивная кристаллизация и наноструктура исчезает [5].

Изучение механических свойств наноматериалов (твердости, прочности, пластичности, параметров упругости) исключительно важно для решения проблем разработки конструкционных материалов с высокими эксплуатационными характеристиками. Механизм деформации наноматериалов неясен. С одной стороны, твердость, прочность, пластичность, относительное удлинение макроскопических твердых тел состоящих из наночастиц являются структурно чувствительными параметрами, зависящими от размера зерен, размера частиц порошка при горячем прессовании и т.д. Твердость закономерно увеличивается при уменьшении размера зерна таких наноматериалов, прочность и особенно пластичность наноматериалов в целом значительно снижаются за счет трещинообразования при наличии в структуре нарушений сплошности и пор, которые и приводят к зарождению трещин. Рост твердости металлических наноматериалов может достигать 600%, хрупкие материалы повышают твердость до 300%. Начальная стадия деформации наноматериалов обусловлена проскальзыванием по границам зерен и генерацией дислокаций из границ зерен в объем зерна, что проявляется в аномалиях соотношения Холла-Петча. Расчет для системы из двух десятков зерен нанокристаллов меди по методу молекулярной динамики показал, что деформация приводит к уширению межзеренных границ. Анализ влияния тройных стыков границ показал, что зарождение дислокаций может протекать в этих областях за счет уменьшения числа узлов совпадения в результате поворотов соседних зерен и отсутствия заметной диффузионной подвижности. Заметим, что значение модуля упругости наноматериалов с малой долей поверхности практически не отличается от модуля крупномасштабных материалов. Так как разрушение макроскопических материалов с наноструктурными элементами носит интеркристаллитный характер, практически не оправдались ожидания повышения

пластичности охрупчиваемых материалов при создании таких наноструктур. Длина трещин в монокристаллах и отдельных зернах наноструктур мало отличается, поэтому вязкость разрушения после достижения своего максимального значения может уменьшаться при уменьшении размера зерна. Таким образом, нанокристаллические материалы являются примером зависимости физико-химических свойств от размера структуры в наномасштабе. В последние десятилетия выяснилось, что когда средний размер зерна в поликристаллическом материале становится меньше 100 нм, свойства ультрадисперсных и нанокристаллических материалов, существенно изменяются. Особенно большие изменения возникают для материалов с размером зёрен менее 10 нм.

Поэтому, с другой стороны, при создании наноструктур в чистом виде с характерными размерами хотя бы в одном направлении менее 100 нм, нанокристаллические материалы демонстрируют одновременно высокую прочность и пластичность. Даже нанокристаллическая керамика пластична при низких температурах. Именно в связи с этими противоречиями по имеющейся классификации дисперсные и ультрадисперсные материалы разделяют на макроскопические (крупнозернистые), микроскопические (субмикрокристаллические) и нанокристаллические.

Строение и свойства макроскопического материала определяется иерархией его структуры и разными уровнями организации при переходе от атомного масштаба к наноскопическому масштабу, далее – микроскопическому и макроскопическому масштабу. Схема, приведенная на рис.1, иллюстрирует программы по поиску принципиально новых материалов и технологий, проведению фундаментальных исследований, позволяющих разрабатывать и конструировать реакторные материалы, начиная с физического и компьютерного моделирования на атомарном уровне. Такой подход плодотворен и при разработке наноструктурных материалов в ядерной энергетике. Задачей такого нового подхода является многомасштабное (multyscale) описание материала снизу – вверх («bottom - up»). На смену старой технологии получения различных материалов и устройств, которую называют технологией «сверху вниз» («top - down strategy»), пришла технология «снизу вверх» («bottom - up strategy»). В технологии «сверху вниз» из макроскопических материалов различными методами получают другие макроскопические или микроскопические материалы и устройства, применяя дробление, растворение, обработку поверхности электронным или лазерным излучением и т.п.

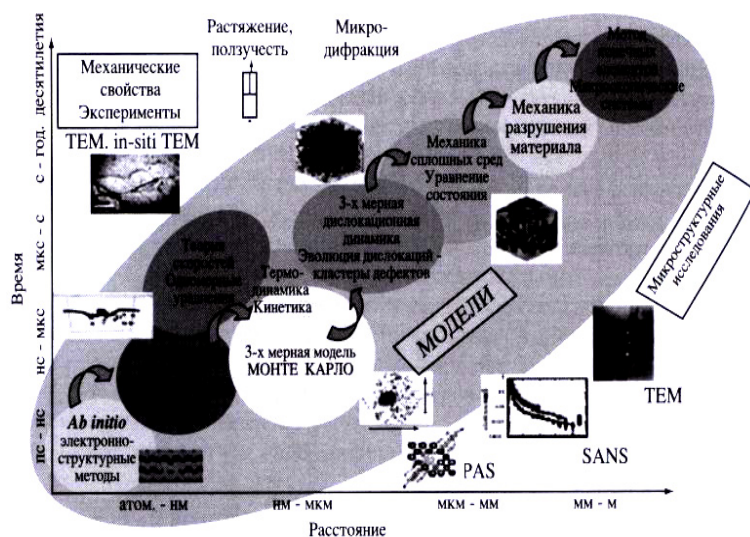


Рис. 1. Схема организации исследований и многомасштабного физического моделирования реакторных материалов [9]

Приведенная пространственно-временная схема многомасштабного моделирования структур от наноуровня до макроуровня проиллюстрирована представленными на рис.2, 3 расчетными и экспериментальными данными для карбида титана в нано и микромасштабе и для атомов углерода на поверхности такого ядерного материала как графит.

Наноуровень, или наномасштаб карбида титана представлен расчетной плотностью электронных состояний атомов титана и углерода в ячейке TiC (рис. 2а, внизу), топографией атомов титана и углерода в кристаллической решетке TiC (рис. 2 а, сверху). На рис. 2 б проиллюстрирован переход от наночастиц карбида титана, выделившихся на отдельном участке образца стали 316 (внизу), к неоднородной микроструктуре стали 316 после облучения до 60 сна (вверху), включающей кроме выделений карбидных частиц поры размером около 0,1 мкм. На рис. 3 приведен пример реконструированной с помощью программы CHART 2,0 топографии атома углерода на поверхности графита с учетом трех ближайших соседей на основе полученных с помощью сканирующей туннельной микроскопии экспериментальных данных. Полученные данные являются основой для моделирования и исследования поверхностных слоев графита и графена.

Отдельный класс составляют аморфные сплавы или металлические стёкла, получаемые при быстром ох-

В новой технологии «снизу вверх» любой материал или устройство, уже существующее в природе или создаваемое впервые, принципиально можно создать, начиная с отдельных атомов. Компьютерное моделирование в сфере нанотехнологий приобретает особое значение. При формировании наномолекул, наноструктур компьютерное моделирование помогает определить стратегию поиска объектов с желаемыми свойствами. В настоящее время компьютерное моделирование позволяет не только давать количественные оценки свойств структур и материалов, но и предсказывать новые свойства, пока недоступные эксперименту. В настоящее время интенсивно развивается «Мультимасштабное моделирование материалов и процессов» (например, [8-13]).

лаждении расплава. Характер связей в металлических стёклах сохраняется. Аморфные сплавы, как и нанокристаллические, по ряду характеристик превосходят свои кристаллические аналоги. Прочность примерно вдвое больше прочности стали, ударная прочность – втрое. Вязкость возрастает с увеличением скорости деформации. Некоторые металлические стёкла имеют повышенную коррозионную стойкость и высокую износостойкость, некоторые – очень малый коэффициент теплового расширения. Проводимость может быть в несколько раз ниже проводимости железа. Важным свойством аморфных сплавов на основе железа является низкий уровень электромагнитных потерь, что определяет их применение в сердечниках высокочастотных трансформаторов, магнитных усилителей, дросселей.

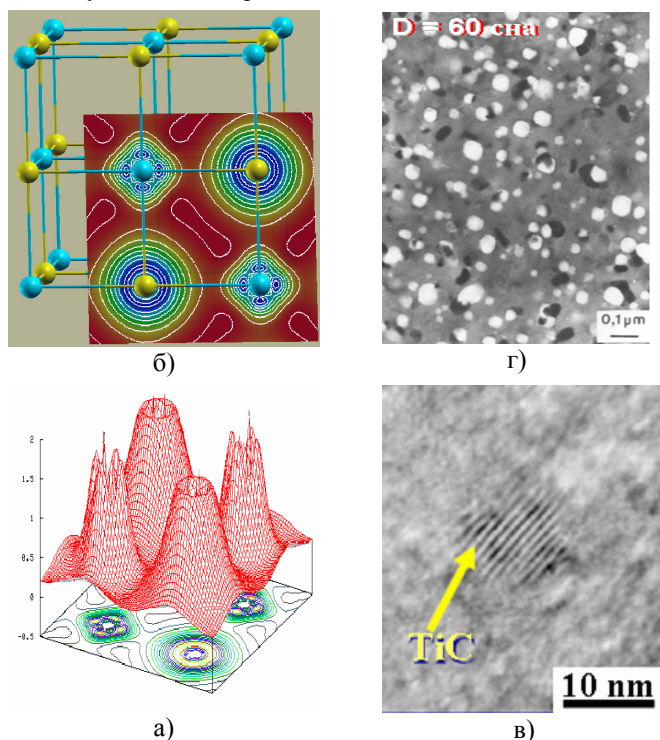


Рис.2. Мультимасштабность карбида титана

а) расчетная плотность электронных состояний TiC; б) проекция в плоскости (100) [10]; в) наноструктура включений TiC; г) микро-структура стали 316 Ti.

В данное время достаточно проблематично прогнозировать процессы формирования, эволюции и стабильности наноматериалов, в основном из-за недостатка однозначно интерпретируемых экспериментальных результатов и сложности расчетов. Тем не менее, переход к наноструктурным материалам способствует снижению энергии формирования дефектов, повышению диффузионной подвижности компонент, регулированию физико-механических свойств, управлению структурно-фазовыми превращениями при образовании неравновесных фаз и сегрегаций. Все это позволяет широко использовать наноматериалы в ядерной энергетике и технике.

НАНОМАТЕРИАЛЫ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Области применения нанотехнологий в атомной энергетике весьма многообразны и охватывают практически весь круг проблем ядерного топливного цикла и создаваемого термоядерного цикла [14-41]:

- Создание нового высокоплотного ядерного топлива с нанодобавками, топливных композиций для тепловыделяющих сборок активной зоны АЭС. Создание нового класса смешанного уран-плутониевого оксидного топлива - МОКС, - от термина «МОХ» – mixed oxides. Освоение торий-уранового цикла - наукоемкая задача, требующая применения высоких технологий [13].
- Создание нанодисперсных материалов конструкционного и функционального назначения. Циркониевые сплавы для ТВЭЛов. Дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) ферритно-мартенситные стали или нанодисперсные ДУО-стали. Исследование стабильности систем, имеющих наномасштабные особенности, особая стабильность нанокластеров в ДУО-сталях.
- Исследование и разработка материалов для быстрых реакторов и будущих реакторов 4-ого поколения. Исследование радиационно-индуцированной микроструктуры. Микроструктурные предсказания возможности продления срока эксплуатации реакторов: корпуса (охрупчивание), внутрикорпусные стали (распухание).
- Разработка и производство быстрозакаленных сплавов-припоев для высокотемпературной безфлюсовой (вакуумной) пайки сплавов циркония, коррозионно-стойких сталей, переходников сталь-цирконий и сталь-титан и других разнородных материалов, обеспечивающих заданный уровень радиационной и коррозионной

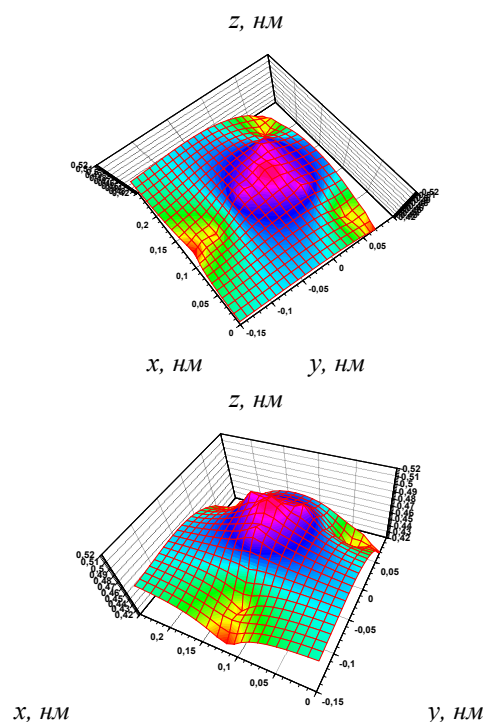


Рис.3. Атом углерода на поверхности графита [12]. Вверху – вид сверху, внизу вид вдоль плоскости поверхностного слоя

стойкости паяных соединений.

- Наномембраны и нанофильтры для технологий обращения с ОЯТ и РАО, керамические материалы для дожигания радиолитического водорода.
- Разработка метрологического обеспечения использования конструкционных и функциональных устройств на основе наноматериалов для ядерных установок.
- Мультимасштабное моделирование наноструктур, материалов и процессов.
- Нанодатчики и наносенсоры для ФЗ и АСУ ТП АЭС. Новые возможности для повышения в десятки раз тактико-технических характеристик систем безопасности и охраны АЭС
- Исследование и разработка материалов будущих термоядерных реакторов. Наноструктурированные материалы blankets и первой стенки ТЯР.
- Наноструктурные сверхпроводники (низко- и высокотемпературные сверхпроводники) для магнитов ИТЭР.

При реализации указанных проблем разрабатываются опытно-промышленные технологии получения функциональных веществ и изделий с использованием нанотехнологий и наноматериалов для ядерной, термоядерной, водородной и обычной энергетики, медицинских препаратов. Рассмотрим некоторые результаты исследования и разработок наноструктурных материалов в ядерной энергетике

Ядерное топливо с нанометрическими добавками. Энергетическая стратегия предусматривает постепенный ввод новых ядерных энерготехнологий на быстрых нейтронах с замыканием ядерного топливного цикла с МОКС - топливом. Дальнейшее развитие атомной энергетики требует включения в структуру мощностей АЭС быстрых реакторов. Из всех типов быстрых реакторов промышленно освоенными на сегодня являются реакторы с натриевым теплоносителем (БН). Примером таких реакторов является реактор БН-600 на Белоярской АЭС, работающий с 1980 года. Предусматривается строительство и пуск в эксплуатацию в 2012 г. 4-го энергоблока Белоярской АЭС с реактором БН-800, создание производства МОКС - топлива и реализация замкнутого топливного цикла на базе этого реактора.

Одним из условий повышения эффективности работы АЭС является увеличение глубины выгорания ядерного топлива. Для обеспечения глубоких выгораний топлива необходимо создание крупнокристаллических структур ядерного топлива с контролируемой пористостью. Крупнокристаллические структуры ядерного топлива удерживают газообразные и летучие продукты деления, препятствуют транспорту осколков деления по границам зерен к оболочке тепловыделяющего элемента, в результате чего существенно снижается повреждаемость оболочки тепловыделяющего элемента.

Для достижения крупнокристаллического состояния при прессовании топливной керамики (UO_2 , $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$, $(\text{U}, \text{Pu})\text{N}$) в нее добавляют ультрадисперсный порошок UO_2 с размерами нанокристаллитов ~ 40 нм. В результате температура спекания топливной керамики снижается на ~ 200 градусов, повышается плотность керамики и увеличивается размер зерна до $35\div 40$ мкм без ухудшения других характеристик. Активация процесса спекания за счет нанодобавок может явиться одним из направлений создания технологий новых видов уран-плутониевых оксидов и нитридов для ядерного топлива быстрой энергетики (рис.4).

Таковыми направлениями являются модифицирование ядерного топлива, создание сложного карбонитрида UZrCN , легированного наноалмазом, доработка и модернизация проекта пилотного завода по изготовлению

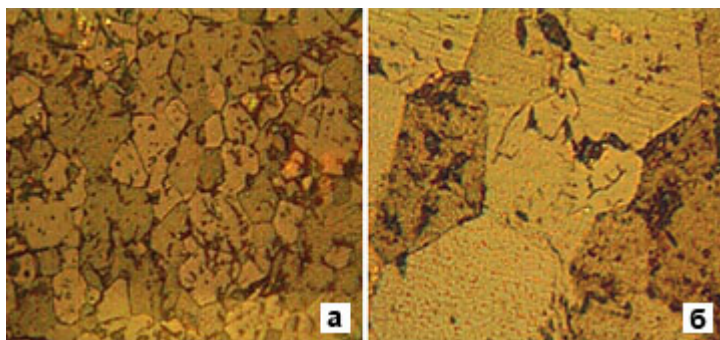


Рис. 4. Микроструктура ядерного топлива
(а) - стандартная микроструктура, (б) - микроструктура, полученная с использованием нанодобавок

МОКС - топлива для БН-800; разработка модели формирования твердых структур на границе расплава реакторных материалов; исследование взаимодействия прототипов расплавленных материалов активной зоны с корпусом реактора, механизм взрыва жидкометаллических капель, крупномасштабное моделирование материалов активной зоны (АЗ). Парадокс использования ультрадисперсных добавок при изготовлении топливной керамики состоит в использовании нанодобавок для получения структуры, близкой к монокристаллической.

Дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) ферритно-мартенситные стали. Нанодисперсные ДУО-стали. Увеличение эффективности работы и срока службы перспективных реакторов на быстрых нейтронах требует, прежде всего, повышения степени выгорания топлива до 18-20% без снижения параметров теплоносителя. Решение этих проблем неразрывно связано с разработкой радиационно-стойких конструкционных материалов, способных работать в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах ($E > 0,1$ МэВ) при флюенсах до $2 \cdot 10^{16}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ до повреждающих доз 160...180 сна при температурах 370...710 С. Основными факторами, определяющими радиационную стойкость конструкционных материалов реакторов на быстрых нейтронах, яв-

ляются: радиационное распухание, радиационная ползучесть, высоко- и низкотемпературное радиационное охрупчивание, а также радиационная стабильность структуры и свойств материала в поле нейтронного облучения. Подобные проблемы существуют при создании радиационно-стойких конструкционных материалов для первой стенки и бланкета международного термоядерного реактора - ИТЭР. При решении этой проблемы возникает необходимость создания нового класса радиационно-стойких металлических материалов, упрочненных наночастицами оксидов металлов. Эти материалы должны удовлетворять таким требованиям [14-19]:

- иметь низкую ползучесть при температурах до 970 К и стабильность размеров, долговечность ~9 лет
- обладать высокой радиационной стойкостью к нейтронному облучению. Доза облучения: ~250 сна;
- обеспечить радиационную стойкость материала оболочки при повышенных характеристиках жаропрочности;
- иметь высокие механические свойства: - высокий предел прочности >300 МПа при 970 К, предел длительной прочности >120 МПа за 10^4 ч при 970 К., относительное удлинение >1%;
- обладать высоким сопротивлением коррозии по отношению к теплоносителям при повышенных температурах и химическую совместимость с топливом;
- в контакте с топливом и потоком натрия иметь высокую химическую совместимость

Один из путей решения данной проблемы - это создание и использование нового класса ферритно-мартенситных радиационно-стойких сталей, упрочненных частицами оксидов нанометрового размера (ДУО-стали), обладающими при этом высокими прочностными и механическими свойствами. Этот путь лежит в глобальном направлении создания конструкционных материалов, упрочненных высодисперсными неметаллическими частицами (наночастицами) и предназначенными для элементов активных зон перспективных ядерных реакторов. Данное направление интенсивно развивается в странах, имеющих развитую инфраструктуру ядерной энергетики (Россия, США, Япония, Китай, Франция, Украина) [20-29].

Основные результаты более ранних исследований дисперсно-упрочненной ферритной стали [30-32] и разработанных порошковых ферритных сталей (на основе базовой стали X13 для всего класса ферритных нержавеющих сталей) [33] после упрочнения высокодисперсными оксидами приводят к следующему выводу. При всех условиях облучения (в ускорителе тяжелых ионов, в реакторах ВВР-М и БН-600) охрупчивания материала не наблюдается. При флюенсе $2,6 \times 10^{23}$ нейтр./см² распухание материала составляет 0,25%, остаточная пластичность 3...4%. Коррозионная стойкость дисперсно-упрочненных сталей в жидком литии, эвтектике литий-свинец, в парах цезия и теллура равна или несколько выше таковой лучших из промышленных сталей реакторного назначения. Сталь обладает достаточно высокой жаропрочностью при 970 К, высокой радиационной и коррозионной стойкостью в жидкометаллических средах и продуктах деления. Несмотря на приведенные факты, порошковая технология не обеспечивает достаточной однородности изделий.

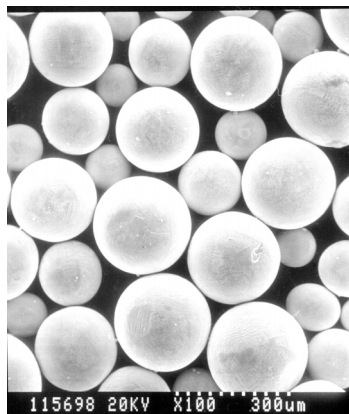


Рис.5. Микрофотография порошка со сферической формой частиц

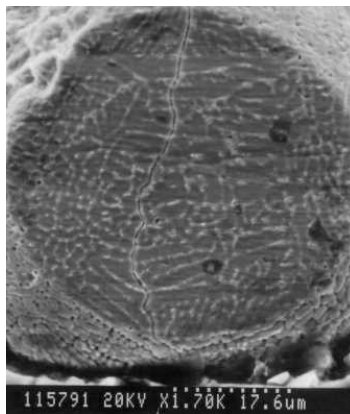


Рис.6. Микрофотография поверхности сферических частиц

В последние годы в России разработан ряд ДУО ферритно-мартенситных сталей для ядерных реакторов на быстрых нейтронах, в том числе и на основе стали ЭП-450 (Fe-13Cr-2Mo-Nb-V-B-O,12C), которая используется в качестве штатного материала тепловыделяющих сборок реактора БН-600 [14, 34].

Разработана новая технология получения ДУО-сталей, которая включает: получение однородных быстрозакаленных порошков со сферической или чешуйчатой формой методом центробежного распыления расплава, твердофазное легирование матричного материала нанодисперсными оксидами иттрия в высокоэнергетическом аттригоре, компактирование порошков и термомеханическую обработку изделия. Эти процедуры способствуют созданию в матрице стали выделений оксидов иттрия нанометрового масштаба. Для получения быстрозакаленных порошков путем диспергирования расплава методом центробежного распыления выбрана технологическая схема получения ДУО ферритно-мартенситных сталей на основе стали ЭП-450 [34]. Центробежным распылением расплава получали порошки двух типов.

Порошки со сферической формой частиц при кристаллизации в свободном полете в атмосфере камеры (рис.5). Структура поверхности материала сферического порошка мелкозернистая и однородная (рис.6). Порошки с чешуйчатой формой частиц, получаемой при кристаллизации порошка на медном экране (рис.7). На поверхности чешуйчатого порошка прослеживается зернистость и вытянутость зерен вдоль направления теплоотвода (рис.8). В обоих случаях при распылении сталей изменений химического состава не проис-

ходит. Используемые оксиды иттрия в исходном состоянии представляли собой агломераты размером несколько микрометров (рис. 9). На рис. 10 показана структура отдельно взятого агломерата. Видно, что он состоит из отдельных кристаллитов, размер которых находится в интервале 40...80 нм. Показано, что наноструктурированная сталь сохраняет достаточно высокое остаточное удлинение после холодной деформации на 60%.



Рис.7. Микрофотография порошка с чешуйчатой формой частиц

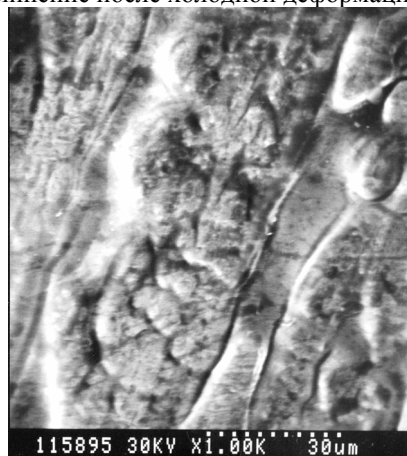


Рис.8. Микрофотография поверхности чешуйчатых частиц

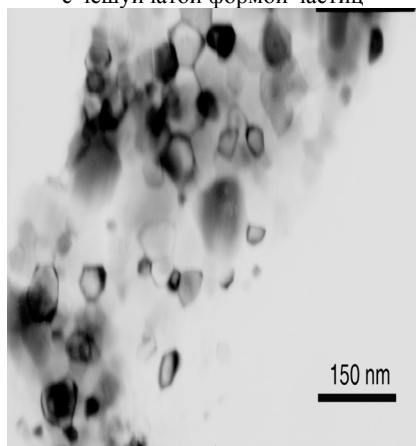


Рис.9 Микрофотография агломератов оксида иттрия

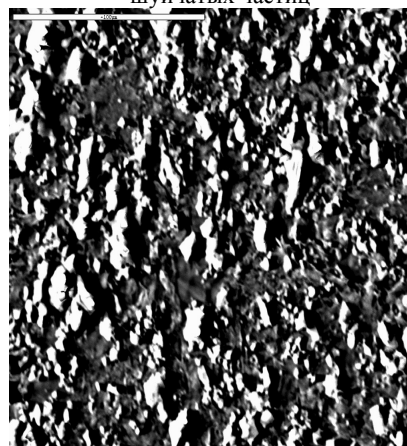
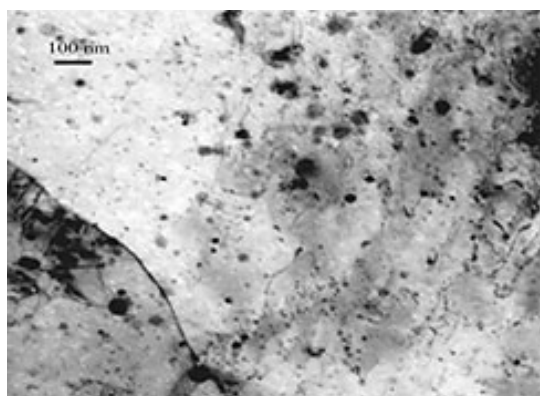


Рис.10. Структура отдельного агломерата оксида иттрия

В результате экструзии произошло, с одной стороны, образование полигонизованной структуры с размером зерен $\sim 3-5$ мкм (рис.11б), с другой стороны, – измельчение оксидов иттрия (рис.11а). Оксиды иттрия расположены в объеме зерна. Размер оксидов внутри зерен составляют 5-10 нм (рис.11 а).



а)



б)

Рис.11. Структура ДУО-стали
(а) – наноструктура, (б) - макроструктура

Некоторые результаты высокотемпературных испытаний сталей ЭП-450 и ЭП-450 ДУО представлены в таблице 1.

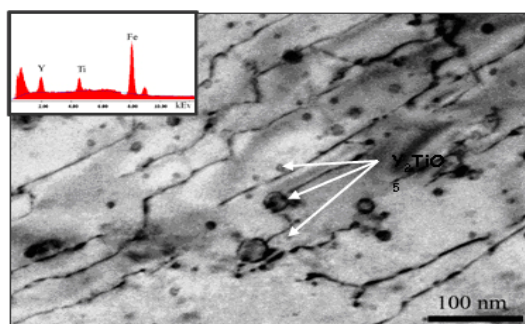
Сталь ЭП450 ДУО имеет ферритную структуру с вытянутыми областями вдоль направления экструзии (рис.12а), состоящими из крупных (30-50 мкм) и мелких (0,5-2 мкм) зерен. Термическая ползучесть стали ЭП-

450 ДУО при температурах 650-700°C значительно ниже по сравнению с обычной сталью (рис. 12 б) [34].

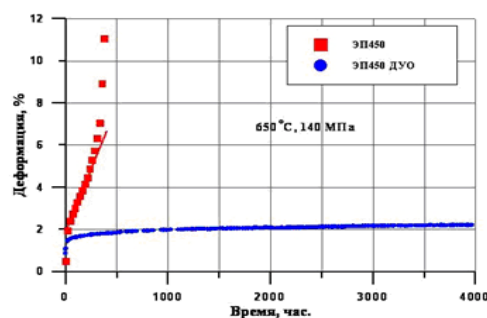
Таблица 1. Результаты испытаний сталей ЭП-450 и ЭП-450 ДУО

T, °C	σ , МПа	Тип материала	Время до разрушения, ч
650	140	Стали по ТУ	392
		ДУО-сталь	нет разрушений образцов, испытания остановлены после 3000 ч
700	120	Сталь по ТУ	2,3
		ДУО-сталь	187

В опытно-промышленных условиях были изготовлены изделия (трубные заготовки, тонкостенные трубы и пластинчатые образцы) (рис.13), дореакторные испытания которых показали многократное, до 8-10 раз, увеличение временных характеристик жаропрочности и высокую радиационную стойкость по сравнению со штатной сталью. Начато опробование технологии производства изделий в заводских условиях.



нанооксиды в стали ЭП450 ДУО

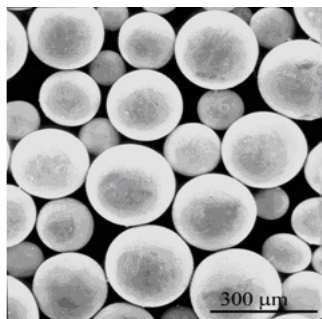


термическая ползучесть сталей ЭП450 и ЭП450 ДУО

а)

б)

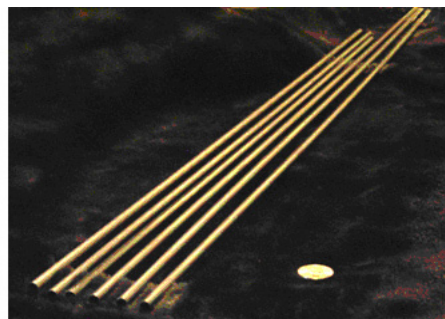
Рис. 12. Структура экструдированного образца стали ЭП 450 ДУО (а) и термическая ползучесть (б) исходной стали (■) и ДУО стали (●)



матричный порошок



трубная заготовка



особотонкостенные трубы

Рис.13. Стадии производства изделий из дисперсно-упрочненных сталей

Наилучшие характеристики по сопротивлению ползучести достигаются при образовании максимального количества равномерно распределенных нанокластеров размером 1-2 нм. Эти частицы распределены с высокой плотностью в объеме материала стали.

На рис. 14 показано изменение распределения частиц Y_2O_3 по размерам для различных вариантов дополнительного легирования сталей с 12% Cr + 0,25% Y_2O_3 добавками переходных металлов Ti, Nb, V Zr. Видно, что добавки титана и циркония в наибольшей степени способствуют измельчению частиц Y_2O_3 .

С учетом полученных результатов в России разработана долговременная (до 2015 г.) программа работ по ДУО-сталей с перспективой изготовления на их основе ТВЭЛов для реактора БН-600. В Японии проведены предварительные исследования жаропрочных свойств и радиационной стойкости высокохромистых ДУО-сталей с содержанием 0,37% мас. нанооксидных частиц Y_2O_3 с размерами ~5 нм [35].

Некоторые результаты исследований показаны на рис. 15. Видно, что предел прочности ДУО-сталей при 700°C более чем в два раза выше стали с обычной структурой, а предел длительной прочности при 700°C за 10000 часов составляет 120 МПа.

На рис. 16 приведены сравнительные зависимости набухания от повреждающей дозы для различных сталей, применяемых в реакторостроении [34]. Видно, что использование сталей ДУО (ОДС) класса имеет значительные перспективы.

На рис. 17 приведена структура сплава Ni-Cr-Mo после обработки, имитирующей действие реакторного

облучения. Исходное гомогенное состояние превратилось в упорядоченную структуру из новых фаз с периодом несколько нанометров. Образование в твердом растворе наноструктурной подрешетки кластеров ближнего упорядочения – ловушек вакансий и интерстиций с периодом 5-10 нм, соизмеримой с длиной свободного пробега радиационных точечных дефектов является наиболее эффективным способом обеспечения радиационной стойкости. Этот интересный эффект, обеспечивающий высокие свойства реакторных материалов, обнаружен в некоторых сплавах. В отличие от обычной деградации свойств реакторных материалов, связанной с появлением хрупкости при радиационном воздействии, облучение этих сплавов приводит к увеличению характеристик прочности при сохранении вязкости при высокодозном облучении. Сплавы подобного класса уже используются для особо ответственных элементов ядерных реакторов: систем управления реакторов АЭС, конструкционных материалов активных зон транспортных реакторов нового поколения. Обнаруженный эффект исследуется применительно к другим системам, и похоже, что это явление может явиться началом развития нового направления радиационного материаловедения – создание конструкционных материалов, «положительно» реагирующих на фактор радиации.

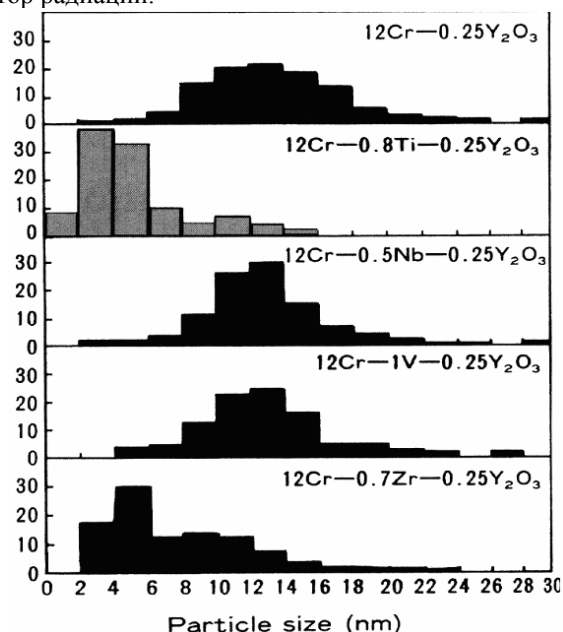


Рис. 14. Распределение частиц оксида иттрия по размерам в ДУО ферритной стали, легированной Ti, Nb, V и Zr

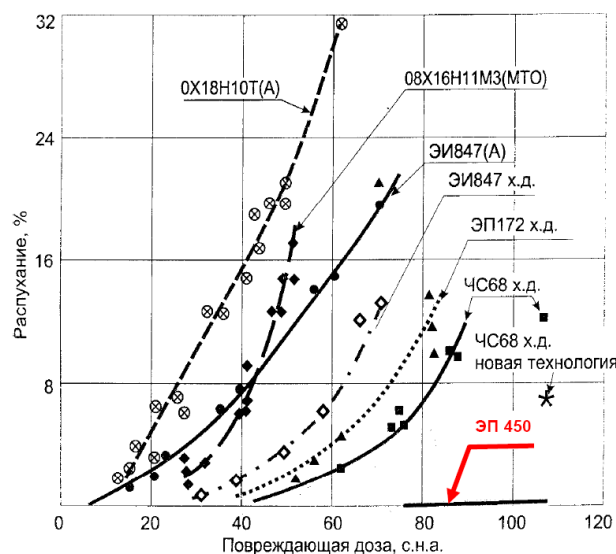


Рис. 16. Дозная зависимость распухания материалов аустенитного и ферритно-мартенситного классов

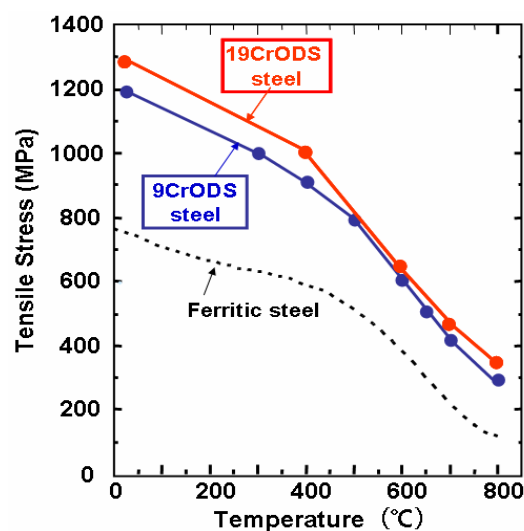


Рис. 15. Зависимость предела прочности при растяжении от температуры ДУО-сталей и обычной стали

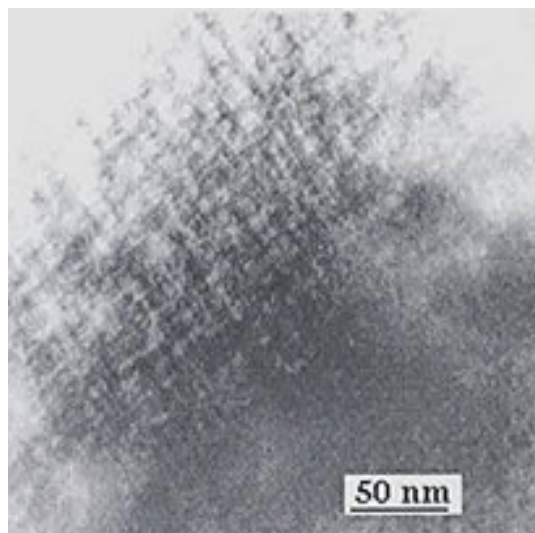


Рис. 17. Наноструктура сплава Ni-Cr-Mo, после обработки, имитирующей действие реакторного облучения

Результаты исследования радиационного воздействия не показали проявления охрупчивания у ДУО-сталей после облучения (рис. 18) [35].

Микроструктурные исследования ДУО-сталей после радиационного воздействия показали, что облучение

приводит к гетерогенному распределению дислокационных петель и повышению их плотности. С увеличением дозы облучения уменьшаются плотность и размер оксидных включений, увеличивается их растворимость в матрице.

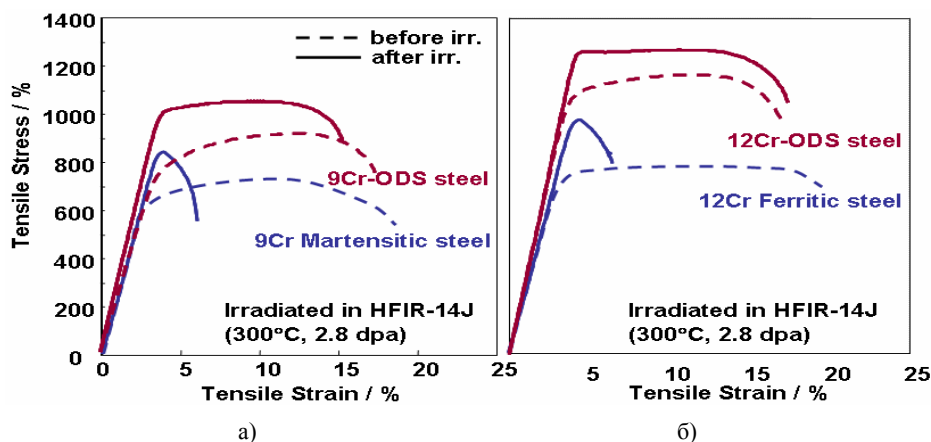


Рис. 18. Влияние реакторного облучения на кривые растяжения ДУО-сталей: а) 9Cr-ODS по сравнению с исходной мартенситной 9Cr сталью и б) 12Cr-ODS по сравнению с исходной ферритной 12Cr сталью

ДУО- стали, содержащие 9Cr, после идентичных коррозионных испытаний по сравнению со стандартной ферритной сталью NF616 (содержащей 9Cr) демонстрируют формирование оксидной пленки с отличной от исходной стали, структурной морфологией и другим механизмом роста оксида, который образуется на поверхности стали с мелкозернистой структурой. Наиболее резким отличием является формирование достаточно толстого оксидного слоя для ДУО-стали (слой 2 на рис.19а), связанного с сверхмелкозернистой структурой стали. Для окисленной ДУО-стали полосы оксида, обогащенные иттрием и хромом, были сформированы по границам зерен и расположены во внутреннем окисном слое (слой 3 на рис.19а). На рис.19а цифрой 1 обозначена граница между верхним поверхностным слоем толщиной до 2 мкм и средним слоем толщиной от 2 до 12 мкм, цифрой 2 – граница между средним слоем и внутренним слоем оксидной пленки, 3 – граница между оксидной пленкой и поверхностью стали. Значительное понижение плотности пленки при увеличении времени выдержки вызывается истощением содержания железа в диапазоне толщин пленки 12-20 мкм, что является результатом роста вакансий и пор во внешнем $(\text{FeCr})_3\text{O}_4$ слое (средняя по вертикали кривая рис.19б). Слой, формирующийся на исходной стали NF616, является более плотным с меньшей пористостью, чем на 9Cr ДУО – стали. Прирост веса при коррозии для ДУО-стали меньше, чем для стали NF616. Повышенное коррозионное сопротивление 9Cr ДУО - стали может быть результатом действия иттрия, как барьера для диффузии катионов вдоль границы оксид/металл [36].

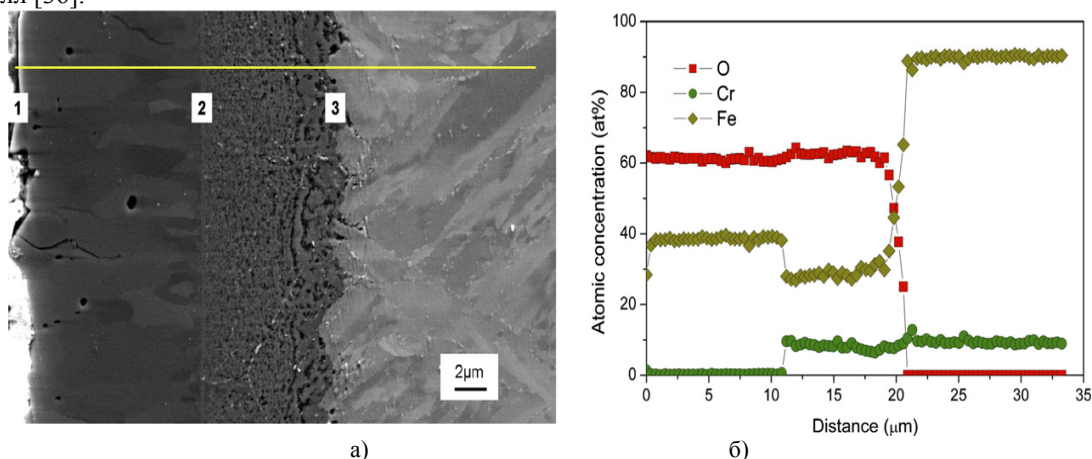


Рис.19. Микрофотография шлифа оксидного слоя (а) и распределение элементов по глубине (б) слоя ДУО-стали

На рис.20 показаны структура и состав окисных/матричных границ, зависящих от размера частицы $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_9$ для сталей Super ODS. Некогерентные частицы укрупняются гораздо быстрее из-за более высокой граничной энергии, приводящей к изменениям силы стоков, которые поглощают точечные дефекты и пузырьки гелия. На рис. 20 слева: крупное выделение (размером > 15 нм) характеризуется некогерентной границей с матрицей, связанной со сферической оболочкой. На рис.20 справа показаны: мелкие выделения (размером < 10 нм) с полуккогерентной границей, связанная с фасеткой выделения (внизу справа).

Роль нанооксидных частиц в процессах коррозии сталей и основные механизмы влияния нанооксидных частиц на свойства ДУО-сталей характеризуются следующими важными факторами:

- наноксидные частицы способствуют более однородному формированию и равномерному распределению исходных оксидов Cr_2O_3 или Al_2O_3 в оксидном слое на сталях, что увеличивает коррозионную стойкость сталей типа Super ODS;

- наноксидные частицы подавляют фазовый распад, что тормозит эффекты охрупчивания в результате старения;

- наноксидные частицы затормаживают движение дислокаций и подавляют каналирование дислокаций, что приводит к упрочнению ДУО-сталей и более высокой жаропрочности за счет присутствия в структуре термически стабильных оксидов размером 3-5 нм.

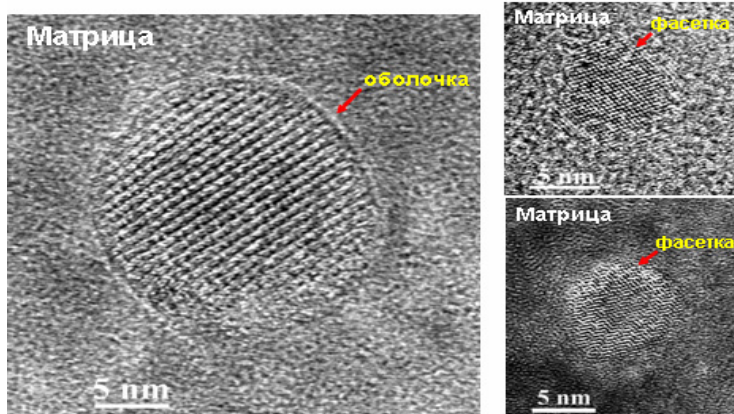


Рис.20. Структура и состав окисных/матричных границ, зависящих от размера частицы $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_9$ для сталей Super ODS

В результате увеличивается сопротивление коррозии, повышаются высокотемпературная прочность и радиационная стойкость сталей.

Примером успешной разработки также являются бористые нержавеющие стали. Для получения равномерного распределения боридов в стали использован метод сверхбыстрого охлаждения [14] частиц расплава с получением рентгеноаморфной структуры. При последующих переделах образуются выделения боридов нанометрового уровня. Переход к наноструктурным боросодержащим выделениям (от 5 до 100 нм) позволяет увеличить содержание бора в 3-4 раза при сохранении пластичности и свариваемости нержавеющих сталей.

Изготовлены тонкостенные трубы из бористых нержавеющих сталей с толщиной стенки несколько десятых долей миллиметра (рис.21). Нержавеющие бористые стали перспективны для использования в системах управления ядерных реакторов, создания ядерно-безопасного оборудования для обращения с отработавшим ядерным топливом и его переработке.

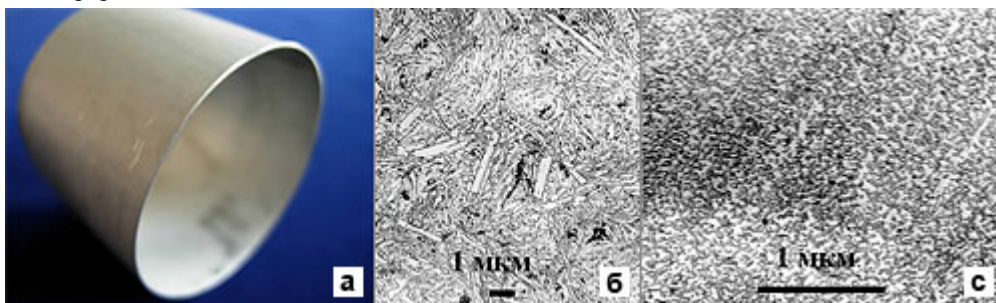


Рис.21. Нержавеющие бористые нанокompозиты:

а – особо тонкостенные изделия из бористой стали; б – обычная сталь; с – нанокompозитная сталь

Новым направлением в нанотехнологии конструкционных материалов ядерной энергетики является не так давно разработанная технология высокотемпературной пайки быстрозакаленными припоями (БЗП), которая позволяет использовать в производстве конструктивных элементов активной зоны ядерных реакторов дисперсно-упрочненные сплавы и разнородные композиции материалов [36]. Обоснование внедрения пайки БЗП основана на известных проблемах сварных соединений: в местах сварки происходит наводороживание, нодулярная коррозия и щелевая коррозия, возможны непровары, проплавления и низкая жесткость. Под сварку требуется определенная контактная площадь, что ограничивает возможность изменения формы, необходим отжиг для снятия напряжений от сварки, приводящий к рекристаллизации и разрушению. Пайка быстрозакаленными припоями – это диффузионное соединение материалов через прослойку, уменьшающую температуру и время создания соединения. Технология пайки с использованием БЗП дает возможность бороться за увеличение ресурса конструкций в активной зоне при следующих преимуществах: узкий (прогнозируемый) температурный интервал плавления; равномерное плавление припоя по объему; хорошая растекаемость и смачиваемость поверхности; высокая капиллярная активность припоя; высокая диффузионная активность компонентов; точно воспроизводимые рабочие характеристики зоны пайки (ширина, состав).

На основе нанотехнологических представлений разработана методика жидкофазного поверхностного легирования материалов с помощью концентрированных потоков энергии (рис. 22) [37].

Показано, что при разработке новых коррозионно-стойких сталей с защитными покрытиями эффективным

является модифицирование поверхностных слоев с применением концентрированных потоков энергии (импульсные электронные пучки, потоки плазмы). Эта методика использована для поверхностного легирования фрагментов ТВЭЛных труб потоками импульсной плазмы (рис.23).

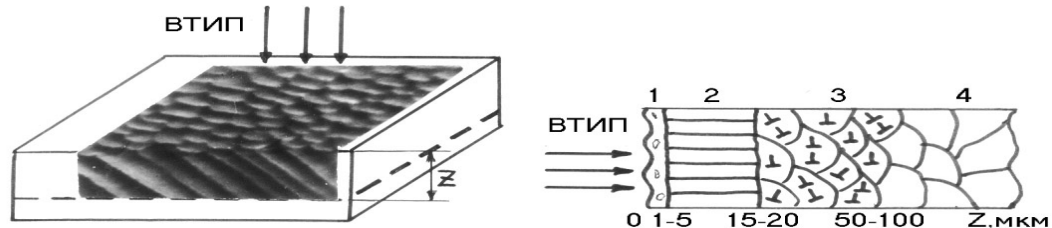


Рис.22. Обработка потоками высокотемпературной импульсной плазмы (ВТИП) приводит к созданию градиентного композитного материала

Основными преимуществами обработки потоками импульсной плазмы является одновременное использование рабочего вещества плазмы как средства для нагрева и легирования; возможность финишной обработки относительно больших (до $0,1 \text{ м}^2$) площадей поверхности или готовых изделий за короткий промежуток времени (несколько импульсов длительностью 10 – 60 мкс); возможность одновременной всесторонней обработки поверхности изделий цилиндрической формы. Основные недостатки: недостаточная изученность процессов, происходящих при взаимодействии потоков импульсной плазмы с твердым телом; трудности в управлении потоком плазмы в имеющихся в настоящее время ускорителях. Схема поверхностного легирования ТВЭЛных труб приведена на рис.23.

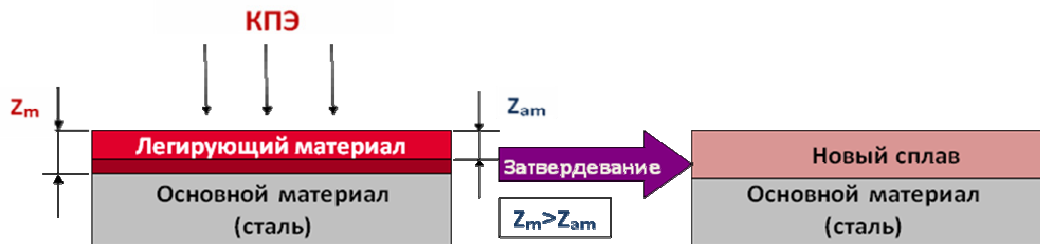


Рис.23. Схема поверхностного легирования с помощью концентрированного потока энергии (КПЭ) ТВЭЛных труб:

Поверхностное легирование сталей включает: предварительную очистку поверхности труб слабым импульсом ВТИП; далее - нанесение тонких ($0,2 \dots 1,3 \text{ мкм}$) однородных слоев легирующих элементов (алюминия, иодидного хрома и сплава на основе силумина) толщиной $Z_m - Z_{am}$ на внешнюю поверхность трубки; далее - промежуточный вакуумный отжиг для диффузионного сцепления покрытия и подложки; далее - жидкофазное перемешивание покрытия с материалом поверхности трубки под воздействием потоков импульсной плазмы. Результаты поверхностного легирования приведены в табл.2. Поверхностный слой после ВТИП близкий к нанокристаллическому.

Таблица 2. Результаты поверхностного легирования стальных труб

Легировующий элемент	Толщина покрытия до обработки, мкм	Максимальная концентрация легирующего элемента, мас. %	Глубина внедрения легирующего элемента, мкм
Никель	1,7 – 4,3	10,0 – 20,0	47,5 – 28,0
Хром	0,2 – 0,65	1,0 – 6,0	18,0 – 34,0
Титан	0,2 – 0,3	0,5 – 2,0	8,5 – 24,3
Ванадий	0,8 – 0,9	2,0 – 4,0	28,0 – 34,0

Обработка потоками импульсной плазмы повышает в 3–10 раз коррозионную стойкость сталей при испытаниях на межкристаллитную коррозию в потоке жидкого свинца и при взаимодействии с парами имитаторов продуктов деления ядерного топлива.

Обработка потоками импульсной плазмы и метод поверхностного легирования с использованием плазменной обработки, перспективны для повышения коррозионной стойкости хромистых сталей в потоке жидкого свинца, при температуре, соответствующей рабочим температурам ТВЭЛных трубок в быстрых реакторах.

Энергетическая стратегия предусматривает постепенный ввод новой ядерной энерготехнологии на быстрых нейтронах с замыканием ядерного топливного цикла с МОКС – топливом. Дальнейшее развитие атомной энергетики потребует включения в структуру мощностей АЭС быстрых реакторов.

На сегодняшний день, использование аустенитной стали ЧС68 (06Х16Н15М2Г2ТФР) для оболочек твэлов и ферритно-мартенситной стали ЭП450 (1Х13М2БФР) в качестве чехлов обеспечили работоспособность ТВС в реакторе БН-600 до повреждающей дозы 83 с.н.а. и выгорания топлива 11% т.а. Однако достигнутое выгорание топлива не обеспечивает эффективных технико-экономических показателей топливного цикла БН. На данный момент ограничение максимального выгорания топлива связано с относительно низкой радиационной стойко-

стью аустенитных сталей и низкой жаропрочностью ферритно-мартенситных сталей. Жаропрочность высокопрочных стареющих сталей определяется устойчивостью упрочненной частицами стальной матрицы при повышенных температурах и нагрузках.

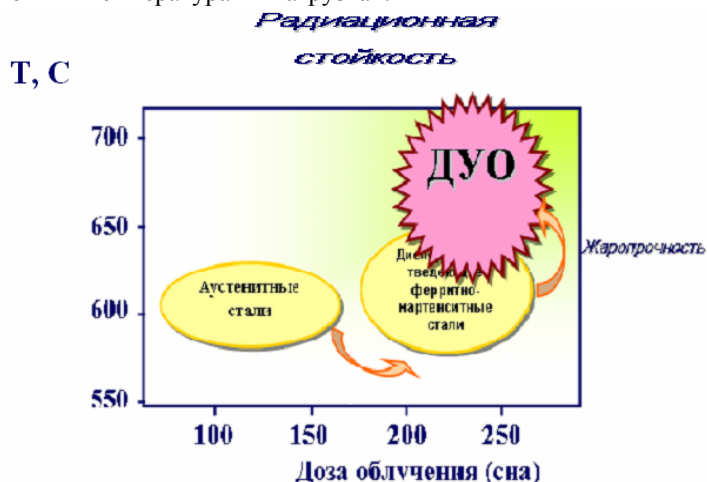


Рис. 24. Схема, иллюстрирующая потерю эффекта дисперсионного твердения в ферритно-мартенситных сталях при температурах свыше 920 К и эффективность дисперсного упрочнения оксидными частицами ДУО – сталей при температурах свыше 970 К

Обычно применяемые для целей упрочнения частицы интерметаллидных фаз или дисперсные карбиды при температурах более 700 °C начинают коагулировать и растворяться. В настоящее время для реакторов типа БН в качестве перспективных конструкционных материалов для поэтапного повышения выгорания рассматриваются, стали практически всех классов: аустенитные, ферритные и ферритно-мартенситные.

Впечатляющие характеристики ДУО-сталей, как по механическим свойствам, так и по радиационной стойкости (рис.24), позволяют планировать использование подобных сталей в термоядерной энергетике в качестве материала первой стенки и blankets термоядерного реактора [16].

Нанокаркасы и пористая нанокерамика. Важным направлением в нанотехнологиях является создание из различных функциональных материалов пористых нанокаркасов с толщиной стенки отдельных пор 10-100 нм и размером ячейки до 1000 нм. На рис.25 показана структура нанокаркаса из бериллия с низкой плотностью и образцы элементов конструкций blankets ИТЭР на основе бериллиевых пористых нанокаркасов [14].

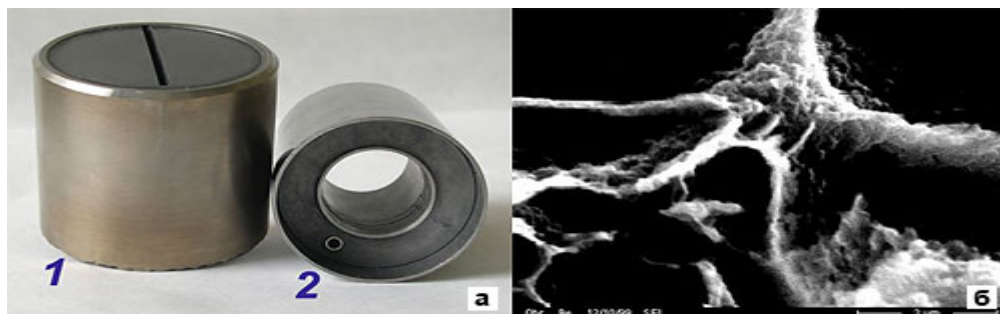


Рис.25. Пористый бериллий для blankets ИТЭР

а – детали устройств; б – сверхпрочный нанокаркас из бериллия

Основными направлениями разработки нанокаркасов является получение сверхпрочных и сверхлегких конструкционных материалов для создания высокопрочных пористых емкостей для хранения высокоэнергетических веществ, включая водород. В качестве материалов для построения каркаса используются металлы, интерметаллиды и керамика. Исследование свойств нанопорошков металлов с различной кристаллической структурой в зависимости от размера частиц показало, что структура на атомном уровне в частицах существенно отличается от атомной структуры даже микроскопических металлов. Так на рис.24 приведена зависимость координационного числа (КЧ) для платины с ГЦК структурой (КЧ=12) в зависимости от размера частиц. Видно, что даже при размере частиц 40 Å число ближайших соседей достигает только значения КЧ=10. На основе исследования нанопорошков тантала, ниобия и алюминия разработана оригинальная технология получения нанопорошков Ta и Nb для высокочастотных конденсаторов (рис.25). Получены порошки с рекордными электрофизическими свойствами: с удельным зарядом до 150000 мкКл/г.

Пористая нанокерамика характеризуется существенно нелинейными механизмами упругой деформации, что обеспечивает высокие характеристики ее прочности, износостойкости и вязкости разрушения. Структура нанокристаллических керамик на атомном уровне также отличается от структуры крупнозернистых материалов существенными особенностями. Это приводит к принципиальным отличиям в проявлении упругих, демпфирующих, прочностных, тепловых, электрических, магнитных и диффузионных свойств. Причем такие отличия обусловлены не только малым размером зерен в нанокристаллических материалах, но и большой долей и особым состоянием границ зерен в них.

В последние годы успешно решается и проблема изготовления крупногабаритных заготовок с нано - и

субмикроструктурной на основе технологий получения нанокерамических порошков. Предложены методы, позволяющие получать нанопорошки методом электрического взрыва, испарением мишени импульсным CO₂-лазером и импульсные электромагнитные прессы для компактирования нанопорошков [38].

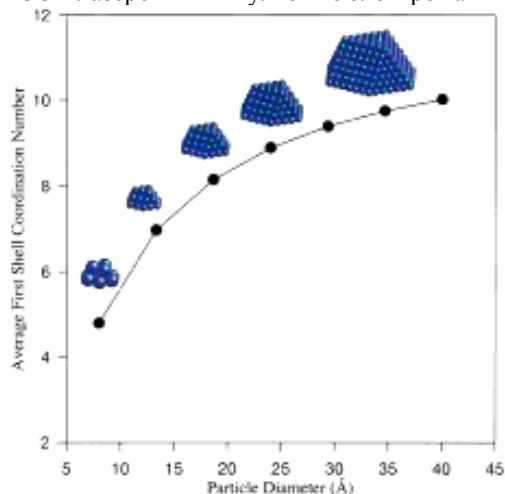


Рис. 26. Зависимость числа ближайших соседей от диаметра частицы Pt [Frenkel et al. J. Phys. Chem. B. v.105, 2001, 12689]

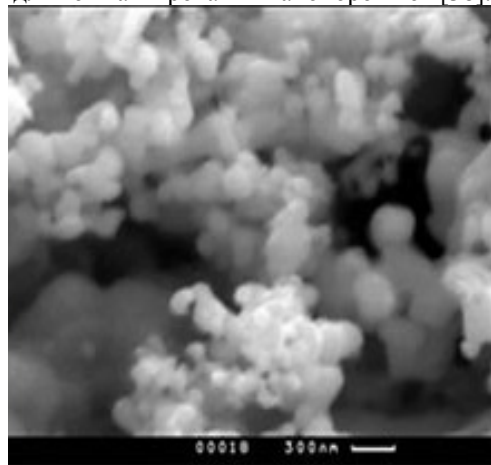


Рис. 27. Нанопорошки Ta и Nb для высокоемких конденсаторов

Это позволяет получать слабо агломерированные нанопорошки металлов, сплавов и керамик со средним размером частиц в области 20-100 нм при производительности до 200 г/час и затратах энергии до 5 кВтч. Форма частиц близка к сферической. Получены нанопорошки Al₂O₃, MgAl₂O₄, Fe₂O₃, TiO₂, ZrO₂, NiO и др. Средний размер частиц 15-50 нм, форма частиц близка к сферической, но в некоторых случаях (NiO) имеются и частицы с формой, близкой к параллелепипеду или кубу. При средней мощности излучения 650 Вт производительность установки составляет от 20 до 60 г/час, а средний размер частиц 10-15 нм. Создание износостойких материалов исследовалось на основе порошков Al₂O₃; с добавкой порошков TiO₂ и ZrO₂, а также на основе порошков MgAl₂O₄ полученных взрывом проволоки из сплава Al с Mg. Средний диаметр частиц 9.4 нм.

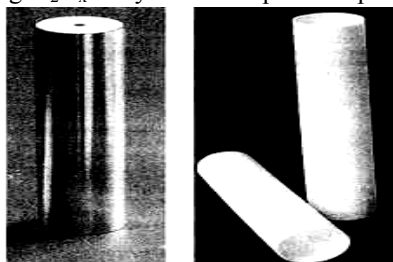


Рис. 28. Керамические изделия с наноструктурой. Слева — сопло из керамики MgAl₂O₄. Справа — трубки из керамики 9.8YSZ для топливных элементов

Показано [36], что микротвердость таких керамик достигает 24 ГПа при размере зерна не выше 300 нм. Примеры созданных изделий из высокопрочных керамик показаны на рис. 28. Такие изделия применяются для агрегатов гидроабразивного резания и для топливных энергетических элементов.

Наномембраны и нанофильтры. Металлические объемные нанофильтры перспективны для использования в системах водоподготовки и очистки теплоносителя реакторов АЭС. Наномембраны, нанофильтры, нанокатализаторы используются в технологиях обращения с ОЯТ и РАО, в системах водоподготовки и очистки теплоносителей, дожигания радиолитического водорода, очистки воздуха и технологических газов и др. целей. Опытные-промышленные установки с использованием нанофильтрации используются в России для дожигания во-

дорода в системах водородной безопасности АЭС, для переработки жидких радиоактивных отходов, очистки газов от радиоактивных аэрозолей, тонкой очистки воздуха и технологических газов [12-16].

На рис. 29 приведена принципиальная схема очистки мембранной технологии. Такая технология позволяющая снижать активность радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr на четыре порядка (табл. 3). Нанофильтры (цеолит, Al₂O₃, оксиды Cu, Sn, Ni, Bi) — это новое направление использования развития нанотехнологии для ультрафильтрации, основанное на создании в объеме системы сообщающихся разветвленных каналов, имеющих нерегулярное сечение от микрометрического до нанометрического размера. Металлические объемные нанофильтры перспективны для использования в качестве тепловых труб. Изделия подобного типа используются в космосе, как элементы системы обеспечения жизнедеятельности космонавтов на МКС, используются в медицинской технике для стерилизации жидкостей, очистке сред в пищевой промышленности.

Сравнительно малое внимание уделяется пока фуллеренам, углеродным нанотрубкам и графенам [39-41].

Способность изменять проводимость на порядки величины делает нанотрубку идеальным элементом для нового поколения электроники — молекулярной электроники. Нанотрубки могут быть использованы для упрочнения связующих при производстве роторов урановых центрифуг. Еще одно важное свойство УНТ обусловлено уникальными сорбционными способностями. Поскольку УНТ является поверхностной структурой, то вся ее масса заключена в поверхности ее слоев. Значение удельной поверхности нанотрубок достигает рекордной величины 2600 см²·г⁻¹. Благодаря этому, а также из-за наличия внутри УНТ полости, нанотрубка способна поглощать газообразные и жидкие вещества. Поскольку диаметр внутреннего канала УНТ лишь в 2-3 раза пре-

вышает размеры молекулы, капиллярные свойства нанотрубки проявляются на нанометровом масштабе.

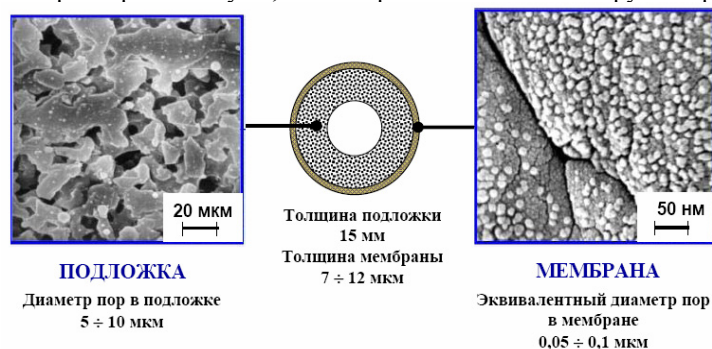


Таблица 3. Результаты очистки жидких радиоактивных отходов (ЖРО)

Радио- нуклид	Начальная активность Ан, Бк/л	Конечная активность Ан, Бк/л
^{137}Cs	$3,1 \cdot 10^4$	< 1
^{90}Sr	$8,3 \cdot 10^4$	< 5

Рис.29. Принципиальная схема очистки мембранной технологии

Сверхпрочные и высоко-электропроводные материалы. Для термоядерных реакторов требуются и обычные проводящие материалы с высокой проводимостью и прочностью, способные работать в сильных магнитных полях и выдерживать высокие механические нагрузки.

Таковыми материалами, например, являются нанокпозиционные проводники на основе сплавов Cu-Nb, имеющие прочность стали и электропроводность, близкой к меди. Для исследовательской техники и бытового применения требуются сверхпрочные и упругие высоко электропроводные материалы.

Ряд современных исследовательских проектов предполагает использование импульсных магнитных полей предельно высокой интенсивности, с индукцией более 50 Тл. Создание импульсных магнитных систем потребовало разработки новых обмоточных материалов с уникальным сочетанием высоких прочностных и электропроводящих свойств.

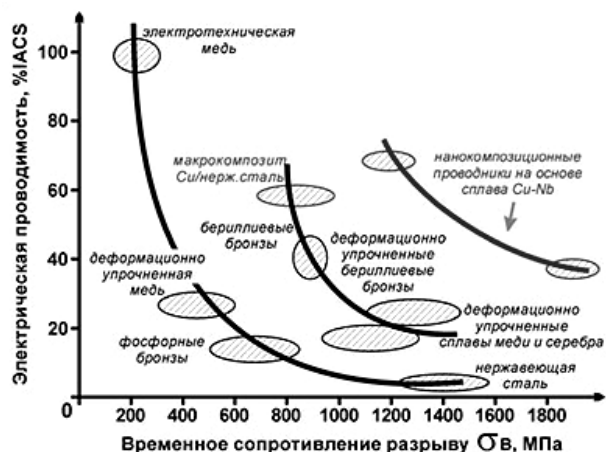


Рис.30. Сравнение характеристик различных проводников

известным проводящим материалам.

Сверхпроводящие наноструктурированные материалы для термоядерной энергетики. Разработка сверхпроводящих материалов в виде наноструктурных сверхпроводников является примером разработки, изначально целью которой явилось получение объемных наноструктурированных материалов.

В результате перехода к нанометрическим структурам удалось в несколько раз увеличить токонесущую способность сверхпроводников, что позволило создать мощные магнитные системы и экономить при этом до 30% электроэнергии. Мощные магнитные поля, удерживающие плазму в термоядерных реакторах, создаются сверхпроводящими системами. Примеры структур сверхпроводящих нанокпозиционных материалов показаны на рис. 31 и 32. В России по промышленным технологиям, разработанных в Бочваровском Институте, изготовлено более 100 тонн многокилометровых сверхпроводящих нанокпозиционных материалов с размером структурных составляющих 1-50 нм. Ставится задача по разработке сверхпроводящего наноструктурированного кабеля, работающего в области азотных температур [14, 18].

Реализация транспортных сверхпроводящих характеристик, высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) затруднена. Подробнее эти проблемы обсуждались многими исследователями (например [42-45]).

В связи с этим проиллюстрируем возможность применения нанотехнологии примерами, связанными с введением наноразмерных добавок TiO_2 (рис.33) и использованием принципа наследственности свойств при росте тонких пленок (рис.34).

Окрашивания структурных составляющих, как выделений, так и зерен ВТСП матрицы дает возможность проведения их идентификации и оценки их текстуры (рис.33). Поверхностный рельеф как «геометрическое по-

Разработаны технологии нового класса высокопрочных Cu-Nb обмоточных проводов прямоугольного сечения со следующими свойствами: предел прочности 1100-1250 МПа; электропроводность около 70% от меди [14]. Нанокпозиционный материал имеет прочность стали при электропроводности, близкой к меди. Разработаны технические высокопрочные Cu-Nb тонкие провода диаметром от 0,4 мм до 0,05 мм со следующими свойствами: предел прочности 1300-1600 МПа, электропроводность 70-80 % от меди. Показана принципиальная возможность создания контактных проводов нового поколения с существенно более высоким комплексом свойств путем использования наноструктурных компонентов. На рис 30. показано место новых наноструктурных электропроводных композитов по отношению к другим

ле», управляющее ростом кристаллитов. Изображенные на рис.34 кристаллы представляют собой сверхпроводящий $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, находящийся на подложке из сплава серебро-палладий, которая обладает определенной структурой – рельефом поверхности. Происхождение полос на поверхности кристаллов связано с формированием двойниковых дефектов. Наличие двойниковых дефектов подтверждает, что кристаллы прошли стадию окисления и обладают сверхпроводящими свойствами, а также то, что они ориентированы совершенно определенным образом – с осью «с», направленной строго вверх, и осями «а» и «b», расположенными параллельно соответствующим граням кристалла. Именно такое, достигнутое искусственно (за счет полосчатого рельефа поверхности), расположение кристаллов наиболее выгодно с точки зрения реализации транспортных сверхпроводящих характеристик, поскольку ВТСП фазы обладают высокой кристаллографической анизотропией свойств.

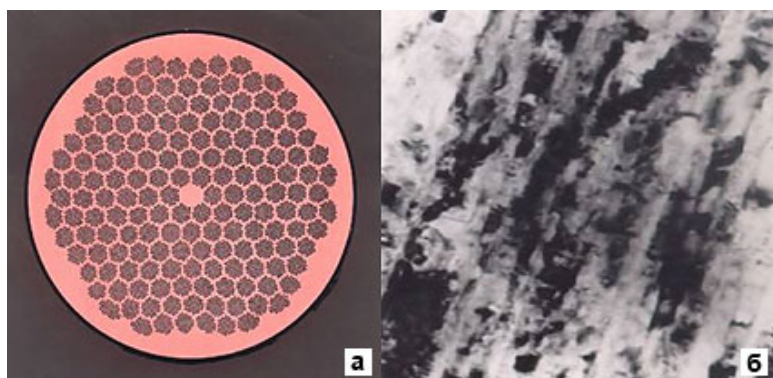


Рис. 31. Сверхпроводящие наноструктурированные материалы для термоядерной энергетики [14]; а) провод Nb-Ti сверхпроводника, диаметр провода 0,85 мм, размер выделений титана в волокнах 10-50 нм (б)

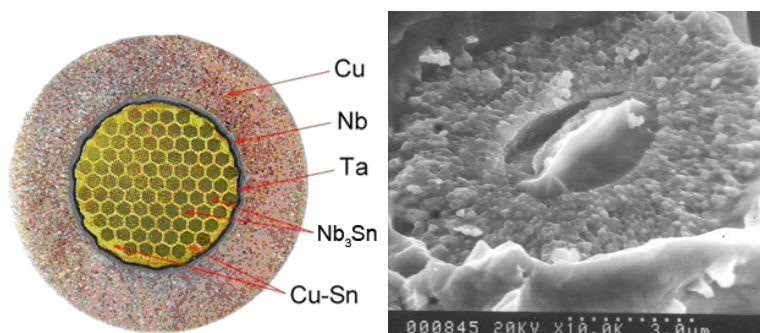


Рис.32. Микроструктура провода Nb_3Sn сверхпроводника (слева). Комплекс свойств достигается при размере кристаллитов 20-30 нм (справа)

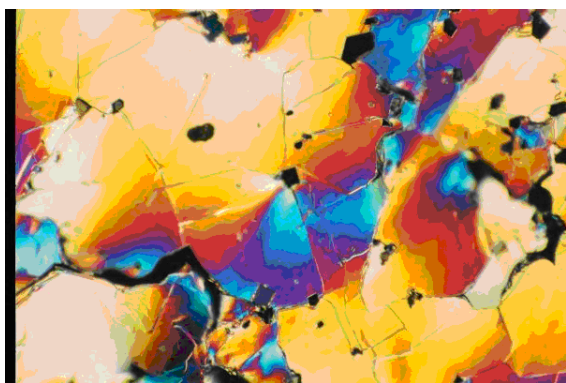


Рис.33. Микрофотографии поверхности сверхпроводящей композиционной ленты на основе Bi-2223 с наноразмерными добавками TiO_2 . 800x

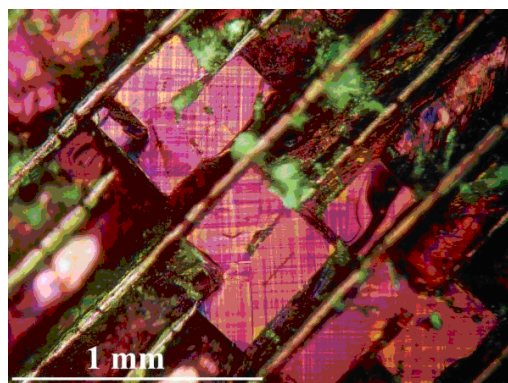


Рис.34. Сверхпроводящий купрат иттрия и бария $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, находящийся на подложке из сплава серебро-палладий с полосчатым рельефом поверхности

Магнитные наноконкомпозиты. В настоящее время производители проявляют повышенный интерес к композитным магнитам, которые обеспечивают повышение уровня технических параметров магнитных систем при одновременном уменьшении их габаритов. Прежде всего, новые магнитные материалы используются в малогабаритных, сверхскоростных электродвигателях и генераторах для авиакосмической, автомобильной и приборостроительной отраслей. Так, на основе эффекта Виганда были созданы магнитные микрокомпозитные материалы на основе сплавов Co-Fe-Nb и Fe-Ni [46, 47]. Получение бистабильного магнитного провода заключается в том, что заготовку, состоящую из магнитомягкой сердцевинки и магнитополужесткой оболочки, подвергают обжатию и волочению. Затем ее отжигают при 1000-1200 °С, проводят волочение до конечного диаметра 0,1-0,3 мм и подвергают деформации. Деформация заключается в растяжении усилием 5-10 кг/мм² и кручении с

плотностью прокручивания 2-5 об/см. В результате такой обработки петля гистерезиса провода приобретает два участка со скачкообразным изменением намагниченности при значениях внешнего магнитного поля. При перемагничивании бистабильного магнитного провода внешним полем в считывающей катушке, размещенной на проводе, наводится импульс электродвижущей силы, соответствующий основному или дополнительному скачкам намагниченности. Разработана и запатентована технология [14] получения нанокристаллических магнитных материалов методом центробежного распыления расплава (рис. 36).. Нанокристаллические магнитные материалы превосходят известные ферриты бария и стронция по магнитной энергии в 6-8 раз.



Рис.35. Магнитные нанокompозиты: а – слитки, б – аморфный порошок, с - изделия

Высокие магнитные свойства композитных магнитов достигаются при точном соблюдении фазового состава материала и создании структуры с размером кристаллитов основной магнитной фазы 20-30 нм (рис. 36). Для этого используется многоступенчатая технология, включающая: получение слитков исходных сплавов в вакуумных индукционных печах; центробежное распыление и получение порошков сплавов в аморфном состоянии; кристаллизационный отжиг и получение порошков с требуемой нанокристаллической структурой.



Рис.36. Схема электронного наносенсора

ния пожаров. Нанодатчики на основе туннельного эффекта обладают сверхвысокой чувствительностью в диапазоне от 0,1 Гц до 200 кГц и могут быть использованы в системах сейсмо- и акустолокации, мониторинга, контроля прочностных характеристик материалов. Чувствительным элементом датчика является наносистема, состоящая из проводящей иглы, выполненной с применением кремниевой микромеханики, сверхтонкой слоистой гофрированной мембраны и системы поддержания туннельного тока.

• Антитеррористические средства, в т.ч. спектральные наноанализаторы сверхнизких концентраций загрязняющих веществ. Многофункциональные сенсоры «электронный нос» для обнаружения и идентификации сверхмалых количеств опасных веществ. На рис. 36 показана наносенсорная нейрноподобная система «Электронный нос», включающая в себя блок наносенсоров, систему записи регистрации сигналов и программное обеспечение распознавания обонятельных образов. Принцип работы прибора заключается в измерении электропроводности набора химических сенсоров при их взаимодействии с парами веществ. В результате адсорбции молекул исследуемого вещества электропроводность чувствительных материалов сенсоров увеличивается. Математическая обработка данных сенсорного массива позволяет сформировать химический образ анализируемого вещества.

• Системы контроля и управления доступа, контроля: идентификационные документы и системы контроля и управления доступа на базе нанометок и нанопамати; замковые устройства для режимных помещений с уникальными электронными ключами – нанометками; Новые средства и методы контроля и защиты документов от подделки, например на основе наноматериалов, микропечати, тонких электронных схем, бумаги с добавлением наночастиц, компактных устройств считывания данных.

• Более компактные и информативные портативные и стационарные металлоискатели и детекторы дви-

жения на основе наносенсоров. Технологии создания наноразмерных гетеромагнитных структур с повышенной устойчивостью к механико-климатическим воздействиям и воздействиям специальных факторов.

• Технологии получения и нанесения нанокompозитных многофункциональных защитных покрытий на конструктивные элементы технических средств и систем безопасности. Основные характеристики покрытий: увеличенный в 2–4 раза срок службы конструктивных элементов систем безопасности в условиях воздействия агрессивных химических кислотно-щелочных сред, а также повышенной влажности и соляного тумана, повышенная до 20 дБ помехозащищенность систем безопасности в условиях воздействия повышенных электромагнитных помех и радиационного фона.

ВЫВОДЫ

Из приведенных результатов видно, что наноструктурные материалы приобретают важную роль в атомной энергетике как конструкционные и функциональные материалы практически на всех стадиях ядерного топливного цикла. Чрезвычайно важным является образование в наноструктурных материалах после облучения упорядоченной наноструктуры из новых фаз с периодом в несколько нанометров, способствующей сохранению свойств материалов при высокодозном облучении. Обнаруженное явление может явиться началом развития нового направления радиационного материаловедения – создание конструкционных материалов, «положительно» реагирующих на фактор радиационного воздействия.

Перспективы применения нанотехнологий в ядерной энергетике связаны с созданием наноструктурных материалов и покрытий конструкционных элементов АЭС и будущих ТЯР с целью повышения твердости, коррозионной и радиационной стойкости, разработкой методов модифицирования ядерного топлива (карбонитрид UZrCN легированный наноалмазом), создание наноструктурных композитов системы SiC / SiC для ТЯР, созданием фильтров и мембран, наноструктурных суперпроводников и сверхпроводников, разработкой новых систем доступа и контроля безопасности АЭС.

Увеличение эффективности работы и срока службы перспективных реакторов на быстрых нейтронах требует неразрывно связано с разработкой радиационно-стойких конструкционных материалов таких как новый класс ферритно-мартенситных сталей, упрочненных частицами оксидов нанометрового размера (ДУО-стали) и обладающими при этом высокими прочностными и механическими свойствами.

Этот путь лежит в глобальном направлении создания конструкционных материалов, упрочненных высокодисперсными неметаллическими частицами (наночастицами) и предназначенными для элементов активных зон перспективных ядерных реакторов. Данное направление интенсивно развивается в странах, имеющих развитую инфраструктуру ядерной энергетики (Россия, США, Япония, Китай, Франция, Украина).

Впечатляющие характеристики ДУО-сталей, как по механическим свойствам, так и по радиационной стойкости позволяют планировать использование подобных сталей в термоядерной энергетике в качестве материала первой стенки и blankets термоядерного реактора.

Другие применения нанотехнологий в энергетике: солнечные батареи, химические преобразователи энергии, новые источники хранения энергии, реакторы по переработке углеводородного сырья в водородное топливо, накопители водорода (нанотрубки, наногеттеры). Переход к наноструктурным материалам позволит создавать для ядерной энергетики материалы с качественно новыми свойствами и создавать новые направления работ энергетического оборудования. Поэтому актуальной задачей является ускоренное развитие работ в области нанотехнологий и наноматериалов, призванное обеспечить реализацию экономической стабильности и инновационные преобразования промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого межгосударственного сотрудничества: материалы совместного совещания-семинара РАН и НАНУ: 21-23 октября 2008 г., ЛОК «Колонтаево» (г. Электросталь). – М.: Наука, 2009. – 357 с.
2. Второй Совместный российско-украинский научно-технический совещание-семинар «Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого международного сотрудничества». Энергодар, Украина, 20-22 октября 2009 г.
3. Р. Фейнман Внизу полным полно места: приглашение в новый мир физики //Химия и жизнь.-2002.-№12.-С.20-26.
4. Научная сессия Общего собрания РАН 19 XII 2002 г. //Вестник РАН.-2003.- Т. 73, №5.- С. 429-439.
5. Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля Наноструктурные материалы. - М.:ИЦ «Академия», 2005.-192с.
6. H. Shioyama Cleavage of graphite to grapheme //J. Mat. Sci. Lett.- 2001. - Vol. 20. - P. 499—500.
7. D. C. Elias, R. R. Nair, T. M. G. Mohiuddin, S. V. Morozov, P. Blake, M. P. Halsall, A. C. Ferrari, D. W. Boukhvalov, M. I. Katsnelson, A. K. Geim, K. S. Novoselov Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane // Science.- 2009. - Vol. 323. - P. 610–613.
8. "Электронной микроскопии и многомасштабному моделированию материалов" (EMMM2007). Москва, 3-7 сентября, 2007, Институт кристаллографии РАН. Москва, 2007. - 423с.
9. В.Д. Рисованный, М.Н. Святкин, А.В. Бычков Исследовательские реакторы и материаловедческий комплекс ОАО ГНЦ НИИАР для реализации инновационных проектов атомной энергетики России и Украины /Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого межгосударственного сотрудничества: материалы совместного совещания-семинара РАН и НАНУ: 21-23 октября 2008 г., ЛОК «Колонтаево» (г. Электросталь). – М.: Наука, 2009. - С.311-323.

10. В.Е. Сторишко Аналитические установки ИПФ НАНУ на базе электростатических ускорителей для характеристики реакторных материалов и валидации теоретического моделирования радиационных дефектов Второй Совместный российско-украинский научно-технический совещание – семинар «Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого международного сотрудничества». Энергодар, Украина, 20-22 октября 2009 г.
11. Valeriy G. Kirichenko, Vladimir M. Kuklin The Formation of the Multiscale Structures on the Crystal Surfaces and Conversion of Crystals under Phase Transformations // Электронной микроскопии и многомасштабному моделированию материалов (EMMM2007). Москва, 3-7 сентября, 2007, Институт кристаллографии РАН. Москва, 2007.
12. В.Г. Кириченко, Е.С. Мельникова Формирование мультимасштабных структур на поверхности графита // Вісник Харківського національного університету. №832. - Сер. фізична "Ядра, частинки, поля". - 2008. - Вип. 4/40/. - С.67-70.
13. В.Г. Кириченко, Е.С. Мельникова Особенности структуры нанометрических поверхностных слоев графита // Вісник Харківського національного університету. №878. - Сер. фізична "Ядра, частинки, поля". - 2009. - Вип. - 4/44/. - С. 79 – 85.
14. А.В. Путилов Разработки ФГУП ВНИИНМ в области нанотехнологий и наноматериалов для атомной отрасли // Российские нанотехнологии.-2007. -Т.2, №9-10.-С. 6-11.
15. Д.Н. Суглобов, Р.М. Яковлев, Б.Ф. Мясоєдов Торий-урановый топливный цикл для тепло- и электроэнергетики // Радиохимия. – 2007.- Т.49, №5. -С.385-392.
16. В.С. Агеев, М.В. Леонтьева-Смирнова, А.А. Никитина и др. Развитие работ по ферритно-мартенситным сталям для инновационных ядерных реакторов на быстрых нейтронах //Тр. 18-й Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. 8-13 сентября 2008, Алушта. Харьков, «Талант-Трейдінг», 2008, с. 234.
17. М.В. Леонтьева-Смирнова, В.С. Агеев, Ю.П. Буданов, Н.М. Митрофанова, А.В. Целищев Конструкционные материалы активных зон российских быстрых реакторов. Состояние и перспективы // Тр. 18-й Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, 8-13 сентября 2008, Алушта, Харьков, «Талант-Трейдінг», 2008. - С. 6.
18. А.И. Кондрик, Г.П. Ковтун, О.А. Даценко, А.П. Щербань Современные материалы для термоядерной энергетики. / Препринт. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008, 88 с.
19. Н.А. Азаренков, Г.П. Ковтун, С.В. Литовченко Нано технологии и наноматериалы в атомной энергетике // Міжнародна наукова конференція «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро-та наноструктур, FMMN'2009». Збірник наукових праць. – Харків: НФТЦ МОН та НАН України, 2009.- С. 152-157.
20. Huetj J.J. Sintered Metal-Ceramic Composites // Elsevier Science Publishers B. V Amsterdam, 1984. - P.197-212.
21. Dewilde L., Gedopt J., Delbrassine A., Driesen, Kazimierzak B. // Proc.of the Inter. Conf. of Materials for Nuclear Reactor Core Application, Bristol, 1987. - P.271-276.
22. Tian Yun, Shan Binguan, Pan Qingchun, Sun Jiguang Stadies on ODS ferritic alloy for advanced LMFBR cladding application in CISRI // Proc.Mater. for Advanced Energy Systems&Fission and Fusion Engineering, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, China, 1995. - P. 110-115.
23. Tian Yun, Shan Binguan, Liu Guangzu et al. An overview of several iron base oxide dispersion strengthened alloys for nuclear application. Mater. for Advanced Energy Systems & Fission and Fusion Engineering / Ed. A.Kohuama et al. Japan. Soc. Mater. Advanced Energy Systems, 1994. - P. 307-312.
24. K. Asano, Y Kohno., A. Kohyama, A. Suzuki and H. Kusanagi Microstructural evolution of an oxide dispersion strengthened steel under charged particles irradiation // J.Nucl.Mat. - 1988. - Vol.155-157. - P. 928-934.
25. S. Ukai, T. Nishida, K. Kaneda, T. Okuda, M. Fujiwara, K. Asabe and S. Hagi Development of oxide dispersion strengthened ferritic steel for fast reactor core application. The fourth Japan – China symposium on Materials for Advanced Energy Systems & Fission and Fusion Engineering ' 96.
26. F. Carre, P. Yvon, P. Chair Innovative Reactor Systems and Requirements for Structural Materials. Workshop on SMINS, Karlsruhe, Germany, June 4-6, 2007.
27. M.K. Miller, D.T. Hoelzer, S.S. Babu, E.A. Kenik, K.F. Russell High Temperature Microstructural Stability of a MA/ODS Ferritic Alloy. High Temperature Alloys: Processing for Properties. Edited by G.E. Fuchs and J.B. Wahl TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) 2003.
28. S. Ohtsuka, S. Ukai, M. Fujiwara, T. Kaito, T. Narita Improvement of 9Cr-ODS martensitic steel properties by controlling excess oxygen and titanium contents //J.Nucl.Mat.- 2004. - Vol.329-333. - P. 372-376.
29. A. Kimura, H.S. Cho, N. Toda and others Nano-sized Oxide Dispersion Strengthening Steels for High-Fuel Cladding / The Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing. November 5-9, 2007, ICC Jeju Island, Korea.
30. В.С. Карасев, С.Д. Мамчич, Ю.П. Мельник-Куцин, В.И. Славута, И.И. Иванова, А.Н.Демидик, И.М. Неклюдов, Б.В. Матвиенко Влияние облучения нейтронами и заряженными частицами на радиационную стойкость дисперсно-упрочненной ферритной стали //Радиационные эффекты в металлах и сплавах. Алма-Ата, 1983, с.127-131.
31. И.М. Федорченко. И.И. Иванова, А.Н. Демидик, Е.Н. Логунцев, В.М. Налесник, М.В. Аверина Влияние облучения на структуру и свойства дисперсноупрочненной ферритной стали //Труды Международной конференции по радиационному материаловедению, Алушта, 1990, с.89-95.
32. И.И.Иванова, А.Н. Демидик, В.В.Попович, С.А.Кохтев Исследование коррозионной стойкости ферритных дисперсно-упрочненных сталей, предназначенных для горячей зоны атомных реакторов //Порошковая металлургия. - 1997, №3/4 - С.25-31.
33. И.И.Иванова, А.Н.Демидик Ферритные дисперсно-упрочненные стали для горячей зоны реакторов на быстрых нейтронах //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2001. - №4(80). - С.65-68.
34. В.С. Агеев, А.А. Никитина, В.В. Сагарадзе, Б.В. Сафронов, А.П. Чуканов, В.В. Цвелев Использование методов металлургии распыленных и быстрозакаленных порошков для изготовления оболочек твэлов из дисперсно-упрочненных ок-

- сидами (дуо) жаропрочных ферритно-мартенситных. сталей //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2007. - №. 2(90). - С. 134-141.
35. T. Okuda, M. Fujiwara Dispersion behaviour of oxide particles in mechanically alloyed ODS steel //Journal of Materials Science Letters. - 1995. – Vol.14. - P. 1600-1603.
36. D.K.H. Mukhopadhyay, F. Froes, D.S. Gelles Development of oxide dispersion strengthened ferritic steel for fusion // J.Nucl.Mat. - 1998. - Vol.258-263. - P. 1209-1215.
37. Б.А. Калин, В.Л.Якушин, В.Т. Федотов, В.И. Польский, О.Н. Севрюков Разработка и применение наноструктурных материалов и наноструктурных состояний в конструкционных материалах, обеспечивающих повышение работоспособности изделий атомной техники //Второй Совместный российско-украинский научно-технический совещание – семинар «Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого международного сотрудничества». Энергодар, Украина, 20-22 октября 2009 г.
38. V. Ivanov, S.Paranin, V. Khrustov et al. Processing of Nanostructured Oxide Ceramics with Magnetic Pulsed Compaction Technique // Key Engineering Materials. - 2002. - Vol. 206-213. - P. 377-380.
39. П. Харрис Углеродные нанотрубки и родственные структуры. Новые материалы XXI века. - М.: Техносфера, 2003.- 336 с.
40. А.В. Елецкий Углеродные нанотрубки // Успехи физических наук. – 1997.- Т. 167, № 9. – С. 945 - 972
41. Scott Bunch, Scott S. Verbridge, Jonathan S. Alden, Arend M. van der Zande, Jeevak M. Parpia, Harold G. Craighead and Paul L. McEuen*Impermeable Atomic Membranes from Graphene Sheets //Nano Lett. – 2008. – Vol.8 (8). – P. 2458–2462.
42. <http://www.superconductors.org/>
43. <http://www.electrik.info/main/fakty/55-budushhee-jenergetiki.html>
44. К.Г. Бозоян, В.Г. Кириченко, Т.А. Коваленко Влияние гамма-облучения на структуру высокотемпературных сверхпроводников $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с добавками ^{57}Fe // Вісник Харківського національного університету. - №585. - Сер. фізична "Ядра, частинки, поля". - 2003. - Вип.1/21. - С. 89-92.
45. В.Л. Гинзбург, Е.А. Андрюшин Сверхпроводимость.-М.: Альфа-М. 2006.-324с.
46. А.И. Великодний, В.Г. Кириченко Магнитные сплавы для вигандовских технологий //Высокочистые металлические и полупроводниковые материалы.- Харьков:ННЦ ХФТИ, ИПЦ "Контраст", 2002.-С.180-182.
47. Н.А. Азаренков, А.И. Великодний, В.Г. Кириченко, Т.А. Коваленко, М.Г. Компаниец, С.Ю. Кочетова Генерация электромагнитных импульсов при циклическом перемагничивании деформированных ферромагнитных сплавов // Вісник Харківського національного університету. - № 832. - Сер. фізична "Ядра, частинки, поля". - 2008. - Вип. 4/40/. - С.25-45.
48. ФГУП "СНПО "Элерон".